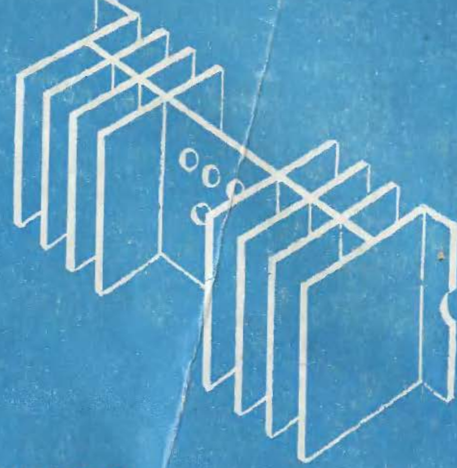
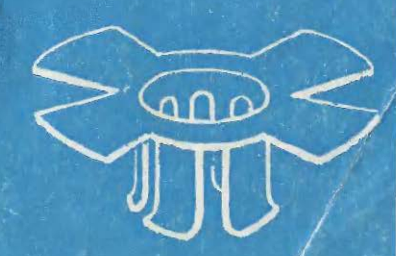




Ю. Ф. Скрипников

РАДИАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ





МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Вып. 817

Ю. Ф. СКРИПНИКОВ

РАДИАТОРЫ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ



«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1973

6Ф0.32
С45
УДК 621.382—71

Скрипников Ю. Ф.

С 45 Радиаторы для полупроводниковых приборов. М., «Энергия», 1973.

48 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека, вып. 817)

Даются основы расчета радиаторов нескольких типов. Приводятся рекомендации по применению радиаторов для транзисторов и полупроводниковых диодов. Рассматривается технология изготовления радиаторов.

Брошюра рассчитана на широкий круг радиолюбителей-конструкторов.

$С\ \frac{0345-051}{051(01)-73}\ 259-73$

6Ф0.32

Юрий Федорович Скрипников
Радиаторы для полупроводниковых приборов

Редактор *Г. С. Гендин*
Редактор издательства *Т. В. Жукова*
Обложка художника *А. М. Кувшинникова*
Технический редактор *Л. Н. Никитина*
Корректор *И. А. Володяева*

Сдано в набор 15/VI 1972 г. Подписано к печати 13/XI 1972 г. Т-17697
Формат $84\times108^1/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 2,52 Уч.-изд. л. 2,73
Тираж 30 000 экз. Заказ 5283 Цена 12 коп.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

г. Владимир, типография имени 50-летия Октября.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Полупроводниковые диоды и транзисторы находят широкое применение в различной электронной аппаратуре. Малые размеры, высокий к.п.д. и большой срок службы определяют интерес радиолюбителей к полупроводниковым приборам. Однако полупроводниковые приборы обладают и недостатками, одним из которых является зависимость их параметров от температуры. Эту зависимость необходимо учитывать при конструировании аппаратуры. Поэтому радиолюбитель-конструктор должен уметь оценивать не только электрические, но и тепловые режимы полупроводниковых приборов в аппаратуре.

Часто отказы полупроводниковых приборов происходят в результате теплового пробоя. Тепловой пробой возникает при плохих условиях отвода тепла, выделяющегося в полупроводниковом приборе. Отдача тепла в окружающую среду должна быть возможно более эффективной. Это является одним из важнейших условий стабильной и надежной работы устройств, в которых применяются полупроводниковые приборы.

Для создания условий равновесия между выделением тепла и его отводом применяются различные теплоотводы. Наиболее простыми и в то же время эффективными теплоотводами являются радиаторы, представляющие собой металлические конструкции, искусственно увеличивающие поверхность охлаждения полупроводникового прибора, тем самым улучшая отвод тепла.

Настоящая брошюра содержит материал по расчету и конструированию некоторых типов радиаторов; приводится приближенный метод расчета радиаторов, дающий вполне удовлетворительные результаты.

Помещенные в брошюре графики и таблицы упростят расчеты радиаторов и сократят вероятность ошибок при расчетах. Практические примеры расчетов, помещенные в приложении, помогут лучше ориентироваться в расчетном материале.

Описанные в брошюре конструкции радиаторов доступны для изготовления радиолюбителям, имеющим некоторый навык в обработке металлов. Изложенные методы изготовления радиаторов не являются лучшими, но простота изготовления и использование подручных материалов и инструментов делают их доступными широкому кругу радиолюбителей.

В приложении приводятся размеры пластинчатых и ребристых радиаторов для некоторых широко применяемых транзисторов и типичных мощностей рассеяния. Эти сведения в отдельных случаях помогут выбрать тип и размеры радиаторов, не прибегая к расчетам.

Автор.

Условные обозначения

t — температура, °С;
$t_к$ — температура корпуса полупроводникового прибора, °С;
$t_п$ — температура перехода полупроводникового прибора, °С;
$t_с$ — температура окружающей среды, °С;
t_m — среднеарифметическая температура, °С;
t_s — средняя температура поверхности радиатора, °С;
P — тепловая или электрическая мощность, *вт;*
$P_{макс}$ — максимальная мощность, *вт, мвт;*
$P_л$ — мощность, рассеиваемая излучением, *вт;*
$\alpha_к$ — коэффициент теплоотдачи конвекцией, *вт/(м*^{2} · °С);
$\alpha_л$ — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием, *вт/(м*^{2} · °С);
α — общий коэффициент теплоотдачи, *вт/(м*^{2} · °С);
$R_{п.с}$ — тепловое сопротивление переход — окружающая среда, °С/*вт;*
$R_{п.к}$ — тепловое сопротивление переход — корпус, °С/*вт;*
$R_{к.с}$ — тепловое сопротивление корпус—окружающая среда, °С/*вт;*
$R_{к.р}$ — тепловое сопротивление корпус-радиатор, °С/*вт;*
$R_{р.с}$ — тепловое сопротивление радиатор — окружающая среда, °С/*вт;*
S — площадь, *м*^{2}, *см*^{2};
$S_{пр}$ — площадь поверхности теплообмена полупроводникового прибора, *м*^{2}, *см*^{2};
$S_р$ — площадь радиатора, *м*^{2}, *см*^{2};
$\theta_{к.р}$ — разность температур между корпусом полупроводникового прибора и радиатором, °С;
$\theta_{р.с}$ — разность температур между радиатором и окружающей средой, °С;
ε — степень черноты;
φ — коэффициент облученности;
λ — коэффициент теплопроводности, *вт/(м* · °С).

Глава первая

ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Конструкции полупроводниковых диодов и транзисторов

Для рассмотрения особенностей конструкций полупроводниковых приборов транзисторы и полупроводниковые диоды можно условно разделить на две группы: мощные и маломощные. Полупроводниковые приборы средней мощности можно отнести к группе мощных, так как их конструкции во многом сходны.

Детальное рассмотрение основных, наиболее распространенных конструкций полупроводниковых приборов необходимо для правильного выбора конструкции радиатора, способа крепления и т. п.

На рис. 1 изображены некоторые типы выпрямительных полупроводниковых диодов. На рис. 1, *а* показана конструкция сплавно-

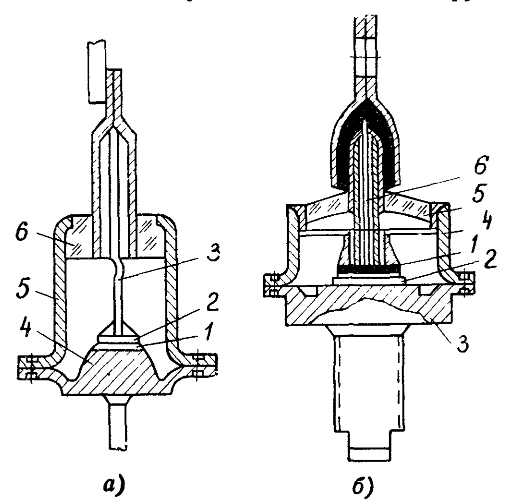


Рис. 1. Конструкции выпрямительных диодов.
а—маломощного; *б*—мощного.

го маломощного кремниевого диода. Переход этого диода образуется вплавлением алюминия в кремний. Пластинка кремния с переходом *2* с помощью припоя припаивается к кристаллодержателю *4*,

который в свою очоредь является основанием корпуса. К кристаллодержателю приваривается корпус *5* с изолятором *6*, через который проходит вывод одного из электродов *3*.

На рис. 1, *б* изображен мощный полупроводниковый диод, у которого кристаллодержатель представляет собой массивное теплоотводящее основание. Основание имеет плоскую внешнюю поверхность с винтом, посредством которого осуществляется тепловой контакт с внешним теплоотводом. Рабочим элементом этого прибора является кристалл *1* полупроводника, который через припой *2* контактирует с кристаллодержателем *3*. К кристаллодержателю приварен корпус *4* с изолятором *5*, через который проходит вывод *6* одного из электродов.

На рис. 2 показаны конструкции маломощного (*а*) и мощного (*б*) кремниевых стабилитронов. По своему устройству кремниевые стабилитроны сходны с выпрямительными диодами.

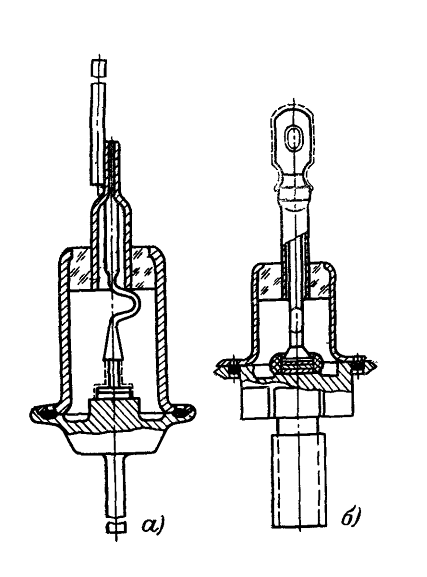


Рис. 2. Конструкции кремниевых стабилитронов.
а—маломощного; *б*—мощного.

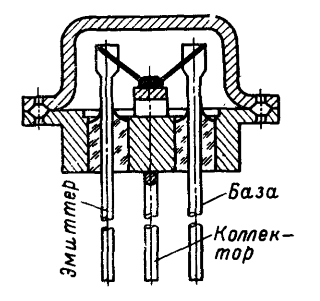


Рис. 3. Конструкция маломощного транзистора.

На рис. 3 схематически представлен маломощный транзистор с холодносварным корпусом. Кристаллодержатель данной конструкции предназначен для монтажа транзисторов типа П401—П403 и им аналогичных. С измененным кристаллодержателем эта конструкция используется и для низкочастотных транзисторов типа МП37—МП42 и др.

На рис. 4 показана конструкция мощных низкочастотных транзисторов типа П209—П210. Основные принципы конструкции используются для многих транзисторов средней и большой мощности.

Зависимость параметров полупроводниковых приборов от температуры

Параметры полупроводниковых приборов в значительной степени зависят от температуры *p-n*-переходов, корпуса прибора и окружающей среды. Оптимальной является температура окружающей

среды в диапазоне $-5 \div +40$ °С. Рассмотрим изменения параметров некоторых полупроводниковых приборов при повышении температуры.

При работе в полупроводниковых приборах рассеивается часть подводимой к ним электрической мощности. Вследствие этого температура внутренних областей и корпуса полупроводникового прибора превышает температуру окружающей среды. Температура *p-n*-переходов и внутренних областей полупроводниковых приборов является важным фактором, от которого зависит работоспособность этих приборов. Для полупроводниковых диодов, как правило, задается максимальная температура корпуса $t_{к.\,макс}$ при оговоренных величинах токов через прибор и обратных напряжений, так как переход диода всегда имеет хороший тепловой контакт с корпусом.

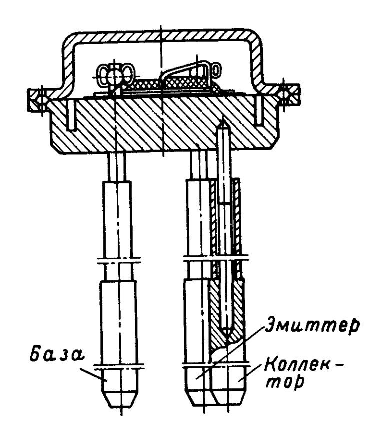


Рис. 4. Конструкция мощных низкочастотных транзисторов.

Для транзисторов задается максимальная температура области коллекторного перехода $t_{п.\,макс}$, так как там происходит выделение большей части рассеиваемой электрической мощности. Повышение внутренней температуры *p-n*-перехода приводит к постепенному старению транзистора, а также к необратимым изменениям, в результате которых транзистор может выйти из строя. Необратимые изменения в полупроводниковых приборах практически происходят при температурах перехода 100 °С для приборов, выполненных на основе германия, и 200 °С для приборов, выполненных на основе кремния.

Максимальная температура перехода $t_{п.\,мак}$ указывается в справочниках. Под максимальной рабочей температурой следует понимать не среднюю, а мгновенную температуру, так как при импульсном режиме работы мгновенная температура может быть значительно выше средней.

Для нормальной работы полупроводниковых приборов необходимо, чтобы температура переходов была всегда ниже предельной. Как показала практика, число отказов уменьшается почти в 2 раза, если температура *p-n*-переходов ниже предельной на 10 °С.

При повышении температуры снижаются предельные данные полупроводниковых приборов. Так, у выпрямительных диодов при повышении температуры *p-n*-перехода сильно увеличивается обратный ток, который может достичь такой величины, что диод потеряет свои выпрямительные свойства. С ростом температуры у германиевых диодов уменьшается величина пробивного напряжения.

У кремниевых стабилитронов при повышении температуры перехода падает напряжение стабилизации.

У тиристоров с повышением температуры возрастают токи утечки в выключенном состоянии, возрастает время и уменьшается ток

выключения. При повышении температуры некоторые тиристоры могут самопроизвольно включаться, что приведет к нарушению работы устройств, в которых они применяются.

При повышении температуры у транзисторов снижаются предельные данные (мощность, напряжение, ток) и изменяются почти все их параметры. Например, для маломощных транзисторов мощность рассеяния снижается на 10 *мвт* при повышении температуры на каждые 5 °C.

Необходимо помнить, что приводимые в справочниках максимальные мощности рассеяния являются скорее предположительными, так как они могут быть реализованы только при определенных условиях — низкой температуре окружающей среды (до 20—25°C), нормальном давлении и идеальных радиаторах, чего на практике почти никогда не бывает. Поэтому для обеспечения надежности полупроводниковых приборов должно уделяться серьезное внимание их охлаждению.

Теплопередача

При определенных мощностях рассеяния поверхность корпуса полупроводникового прибора не может обеспечить необходимую теплоотдачу в окружающую среду, поэтому для улучшения теплоотдачи применяют различные теплоотводящие устройства. Существует несколько способов отвода тепла от полупроводниковых приборов. Наиболее простым можно считать способ отвода тепла за счет естественной конвекции при искусственно увеличиваемой поверхности теплообмена путем использования радиаторов. При этом полупроводниковый прибор, установленный на радиатор, отдает последнему бо́льшую часть тепла. Нагретый воздух поднимается вверх, а на его место поступает холодный воздух. Таким образом осуществляется постоянный теплообмен между воздухом и радиатором.

Мощность, которая может быть передана конвекцией, определяется по формуле

$$P_к = \alpha_к (t - t_c) S,$$

где $P_к$ — мощность, передаваемая в единицу времени конвекцией, *вт*; $\alpha_к$ — коэффициент теплопередачи конвекцией, *вт*/(*м*^{2} · °C); S — площадь поверхности теплообмена, *м*^{2}; t—температура охлаждаемой поверхности, °C; t_c —температура окружающей среды, °C.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией численно характеризует мощность, которую рассеивает или воспринимает единица поверхности охлаждаемого тела путем конвекции при разности температур между охлаждаемым телом и окружающей средой 1 °C.

Коэффициент $\alpha_к$ можно рассчитать с достаточной для практики точностью по следующим упрощенным формулам:

для вертикально ориентированной поверхности высотой l или цилиндра диаметром l (в метрах)

$$\alpha_к = k_1 \left(\frac{t - t_c}{l} \right)^{1/4};$$

для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх,

$$\alpha_к = 1,30\, k_1 \left(\frac{t - t_c}{a} \right)^{1/4}.$$

где a — наименьшая сторона, ограничивающая поверхность, *м*;

для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз,

$$\alpha_к = 0,70\, k_1 \left(\frac{t - t_c}{a}\right)^{1/4}.$$

Значения коэффициента k_1 для воздуха приведены в табл. 1. В этой таблице величина t_m есть среднеарифметическая температура:

$$t_m = 0,5\,(t + t_c).$$

Коэффициент $\alpha_к$ рассчитывается для плоских и цилиндрических поверхностей, плоских ребер радиаторов и т. п. Приведенные формулы дают удовлетворительные результаты, если выполняется неравенство

$$t - t_c \leqslant \left(\frac{840}{a}\right)^3, \ ^\circ C,$$

где a — наибольший размер, ограничивающий плоскую или цилиндрическую поверхность, *мм*.

За наибольший размер принимаются: для пластины — ее длина, для цилиндрических поверхностей и полупроводниковых приборов — их наибольший диаметр.

Если это неравенство не выполняется, то формулы для расчета коэффициента $\alpha_к$ принимают вид:

Таблица 1

Зависимость коэффициента k_1 от t_m

t_m, °C	10	20	30	40	60	80	100	120	140	150
k_1	1,40	1,38	1,36	1,34	1,31	1,29	1,27	1,26	1,25	1,24

для вертикально ориентированной плоской поверхности

$$\alpha_к = k_2\,(t - t_c)^{1/3};$$

для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вверх,

$$\alpha_к = 1,3\, k_2\,(t - t_c)^{1/3};$$

для горизонтально ориентированной поверхности, обращенной нагретой стороной вниз,

$$\alpha_к = 0,70\, k_2\,(t - t_c)^{1/3}.$$

Значения коэффициента k_2 для воздуха приведены в табл. 2.

Таблица 2

Зависимость коэффициента k_2 от t_m

t_m, °C	0	20	40	60	80	100	150
k_2	1,69	1,61	1,53	1,45	1,39	1,33	1,23

Коэффициент $\alpha_к$ для маломощных диодов и транзисторов, а также для цилиндрических радиаторов малых размеров может быть рассчитан по формуле

$$\alpha_к = M N k (t - t_с)^{0,215},$$

где M—параметр, зависящий от отношения длины к диаметру цилиндра l/D; N — параметр, зависящий от диаметра цилиндра d.

На рис 5. показана зависимость параметра M от l/D цилиндра, а

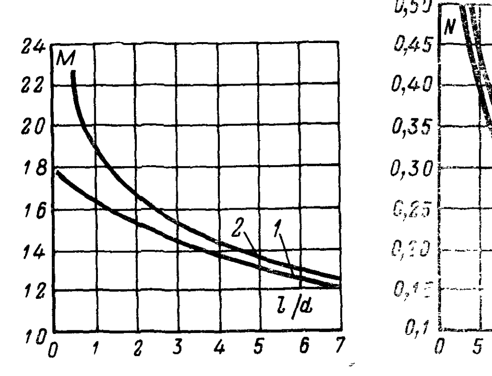


Рис. 5. Зависимость параметра M от соотношения l/d. 1—горизонтальная ориентация цилиндра; 2—вертикальная ориентация цилиндра.

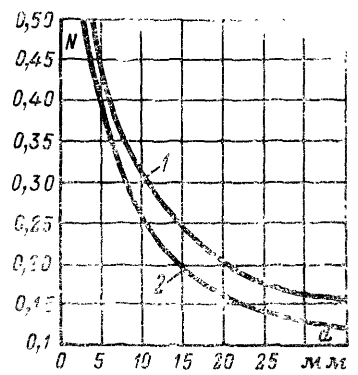


Рис. 6. Зависимость параметра N от d.
1—горизонтальная ориентация цилиндра; 2—вертикальная ориентация цилиндра.

на рис. 6 — зависимость параметра N от l/D цилиндра. На рис. 7 показана зависимость $(t - t_с)^{0,215}$ от $(t - t_с)$. Коэффициент k зависит от физических параметров среды, которые определяются среднеарифметической температурой t_m. Значения коэффициента k приведены в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость коэффициента k от t_m

t_m, °С	0	20	40	60	100	140	180	220
k	1,33	1,32	1,30	1,29	1,27	1,25	1,23	1,21

В условиях естественной конвекции значительная часть энергии рассеивается в окружающую среду путем излучения. Для расчета мощности P передаваемой излучением в единицу времени от поверхности площадью S в окружающую среду, можно использовать формулу

$$P_л = \alpha_л (t - t_с) S,$$

где $\alpha_л$ — коэффициент теплоотдачи излучением, $вт/(м^2 \cdot °С)$.

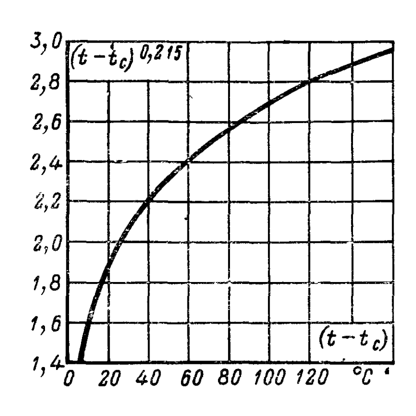


Рис. 7. Зависимость $(t—t_c)$ 215 от $(t—\ )$.

Коэффициент теплоотдачи излучением зависит от степени черноты ε участвующих в теплообмене тел. Степень черноты ε характеризуется отношением мощности излучения P реального тела к мощности излучения P абсолютно черного тела при одной и той же температуре, т. е. $\varepsilon = P/P_0$.

Степень черноты различных тел может изменяться от нуля (абсолютно белое тело) до единицы (абсолютно черное тело).

Значения степени черноты некоторых материалов при различных состояниях их поверхностей приведены в табл. 4.

Таблица 4

Степень черноты различных поверхностей

Материал и состояние поверхности	Температура, °С	Степень черноты ε
Алюминий листовой необработанный . .	25	0,07
Алюминий (сильно окислен)	35—500	0,20—0,31
Алюминиевая фольга без масла	100	0,09
Алюминиевая фольга, покрытая слоем масла	100	0,56
Дюралюминий Д-16	—	0,37—0,4
Железо листовое никелированное полированное	100	0,06
Железо луженое блестящее	—	0,06
Железо оцинкованное новое	—	0,23
Железо оцинкованное старое	—	0,28
Железо, покрытое ржавчиной	—	0,68
Краска защитно-зеленая	20	0,90
Краска бронзовая	100	0,51
Краска алюминиевая	100	0,28
Краски эмалевые; лаки различных цветов .	100	0,92
Латунь полированная	25	0,05

Материал и состояние поверхности	Температура, °С	Степень черноты ε
Латунь прокатанная необработанная	—	0,07
Латунь, прокатанная и обработанная грубым наждаком	25	0,20
Латунь тусклая	50—300	0,22
Латунь хромированная полированная	100	0,075
Медь шероховатая	—	0,72
Медь тянутая	—	0,97
Медь шлифованная	20	0,03
Медь, шабренная до блеска	20	0,07
Медь полированная	100	0,04
Окиси металлов	—	0,4—0,8
Олово; луженое кровельное железо	100	0,07—0,09
Силуминовое литье (в песчаной форме)	100	0,33
Силуминовое литье (в кокильной форме)	100	0,2
Сталь полированная	100	0,066
Сталь листовая с пленкой от прокатки	100	0,66
Сталь листовая сильно окисленная	25	0,80—0,82
Цинк; оцинкованное железо	25	0,23—0,27
Чугун с гладкой поверхностью	25	0,80
Чугун с шероховатой поверхностью	25	0,82

Коэффициент теплоотдачи излучением рассчитывается по формуле

$$\alpha_л = \varepsilon_{12}\,\varphi_{12}\,\theta,$$

где ε_{12} — приведенная степень черноты системы тел, между которыми происходит процесс лучистого теплообмена; φ_{12} — коэффициент облученности, зависящий от расположения системы тел.

Через θ обозначена функция от температуры первой t_1 и второй t_2 поверхностей, участвующих в лучистом теплообмене. Значения функции θ [$вт/(м^2 \cdot °С)$] от t_1 и t_2 представлены в табл. 5.

Как было показано, расчет лучистого теплообмена сводится к определению значений φ_{12} и ε_{12}.

Приводимые формулы для расчета φ_{12} и ε_{12} даны для наиболее распространенных случаев теплообмена излучением.

При теплообмене излучением поверхности S_1 с окружающей средой

$$\varphi_{12} = 1;\ \varepsilon_{12} = \varepsilon_1;\ t_2 = t_с.$$

Таблица 5

Зависимость θ от t_1 и t_2

t_1, °C	t_2, °C														
	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100
10	5,03														
15	5,16	5,32													
20	5,31	5,45	5,59												
25	5,45	5,59	5,76	5,90											
30	5,59	5,76	5,90	6,05	6,20										
35	5,76	5,90	6,05	6,20	6,35	6,51									
40	5,90	6,06	6,20	6,35	6,51	6,60	6,82								
45	6,05	6,20	6,35	6,51	6,66	6,83	7,00	7,14							
50	6,20	6,35	6,51	6,67	6,83	7,00	7,17	7,35	7,50						
60	6,65	6,70	6,87	7,04	7,19	7,35	7,51	7,69	7,87	8,05					
70	6,90	7,06	7,21	7,39	7,55	7,72	7,86	8,05	8,24	8,42	8,80				
80	7,27	7,44	7,59	7,75	7,80	8,07	8,26	8,45	8,65	8,83	9,20	9,62			
90	7,63	7,82	7,98	8,13	8,31	8,49	8,67	8,86	9,04	9,25	9,65	10,03	10,46		
100	8,03	8,19	8,37	8,53	8,72	8,91	9,09	9,28	9,46	9,66	10,08	10,49	11,01	11,36	
110	8,43	8,60	8.79	8,97	9,15	9,33	9,51	9,71	9,90	10,10	10,51	10,93	11,38	11,82	12,30
120	8,85	9,02	9,20	9,40	9,56	9,77	9,98	10,17	10,35	10,56	11,01	11,42	11,87	12,31	12,80
130	9,30	9,49	9,65	9,88	10,01	10,22	10,41	10,62	10,81	11,02	11,42	11,90	12,37	12,82	13,32
140	9,75	9,95	10,12	10,30	10,50	10,72	10,90	11,10	11,31	11,51	11,94	12,40	12,89	13,40	13,85

При двух параллельных плоскостях, размеры которых значительно больше расстояния между ними (рис. 8, *а*),

$$\varphi_{12}=1;\ \varepsilon_{12}=\frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1}+\dfrac{1}{\varepsilon_2}-1}.$$

Рис. 8. Взаимное расположение тел, участвующих в лучистом теплообмене.

Если одно тело, не имеющее вогнутостей, находится внутри другого тела (рис. 8, *б*) то

$$\varphi_{12}=1;\ \varphi_{21}=\frac{S_1}{S_2};\ \varepsilon_{12}=\frac{1}{\dfrac{1}{\varepsilon_1}+\left(\dfrac{1}{\varepsilon_2}-1\right)\varphi_{21}}.$$

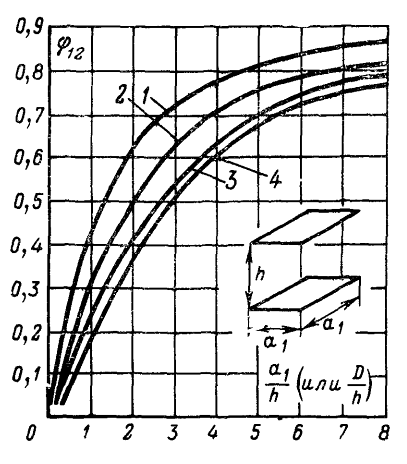


Рис. 9. Коэффициент облученности параллельных плоских тел.
1—полосы ($a_2/a_1 \gg 1$); *2*—прямоугольники ($a_2/a_1=2$); *3*—квадраты; *4*—круги.

При двух одинаковых плоскостях, расположенных на расстоянии h одна от другой (a_1 и a_2 — длины сторон прямоугольника; D — диаметр круга на рис. 8, *а*), значение коэффициента φ_{12} можно определить по графику на рис. 9.

На рис. 10 показан график для определения коэффициента φ_{12} для взаимно перпендикулярных прямоугольников, имеющих общую грань a_2 (см. рис. 8, *б*).

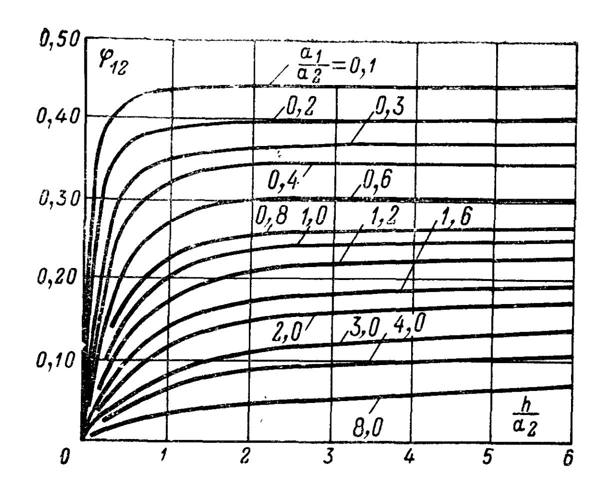


Рис. 10. Коэффициенты облученности взаимно перпендикулярных прямоугольников с общей гранью.

Для внутренних поверхностей ребристого радиатора

$$\varphi_{12} = \frac{b}{b+2h},$$

где b — расстояние между ребрами; h — высота ребра.

Общий коэффициент теплоотдачи α включает в себя конвективный и лучистый коэффициенты и равен

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}}.$$

Для внутренних поверхностей ребристого радиатора коэффициент теплоотдачи определяется для каждой i-й поверхности из соотношения

$$\alpha = \alpha_{\text{к}\,i}\, q_i + \alpha_{\text{л}\,i},$$

где

$$q_i = \frac{t_s - t_{\text{с}\,i}}{t_s - t_{\text{с}}};$$

t_s — средняя температура поверхности радиатора.

Тепловые сопротивления

Тепловое сопротивление полупроводникового прибора является количественной характеристикой, показывающей, насколько затруднено рассеивание тепла, выделяющегося в нем при работе. Математически тепловое сопротивление показывает, на сколько градусов повышается температура полупроводника в области перехода при увеличении рассеиваемой на нем мощности на 1 *вт* (или 1 *мвт*).

На рис. 11 представлена тепловая модель транзистора (или любого другого полупроводникового прибора), установленного на ради-

аторе. Здесь $t_п$, $t_с$ — температуры перехода и среды; P — мощность, выделяемая в приборе; $R_{п.к}$, $R_{к.с}$, $R_{к.р}$, $R_{р.с}$ — соответственно тепловые сопротивления переход — корпус, корпус—среда, корпус—радиатор и радиатор — среда.

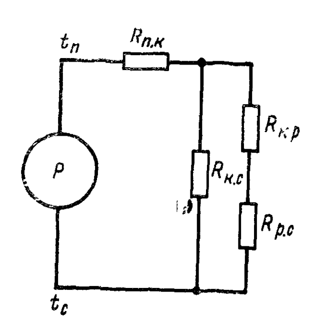


Рис. 11. Тепловая модель полупроводникового прибора, установленного на радиаторе.

Транзисторы, работающие без теплоотводов, характеризуются тепловым сопротивлением между областью электронно-дырочного перехода в кристалле полупроводника и окружающей средой $R_{п.с}$. Это тепловое сопротивление зависит от конструкции транзистора и может быть вычислено по формуле

$$R_{п.с} = R_{п.к} + R_{к.с}.$$

Значения теплового сопротивления $R_{п.к}$ для некоторых типов полупроводниковых приборов приведены в табл. 6.

При наличии радиатора тепловое сопротивление между корпусом и окружающей средой равно

$$R_{к.с.общ} = \frac{R_{к.с}(R_{к.р} + R_{р.с})}{R_{к.с} + R_{к.р} + R_{р.с}}.$$

Тепловое сопротивление корпус—радиатор $R_{к.р}$ зависит от качества теплового контакта между транзистором и радиатором. При плотном прилегании транзистора к поверхности радиатора тепловое сопротивление мало и находится в пределах $(0{,}5 \div 1{,}0)$ °C/*вт*.

При использовании между корпусом полупроводникового прибора и радиатором изолирующей прокладки следует учитывать ее влияние на тепловое сопротивление $R_{к.р}$. Так, для слюды толщиной 0,06; 0,14 и 0,41 *мм* тепловое сопротивление $R_{к.р}$ равно 1,6; 2,0 и 2,7 °C/*вт* соответственно. Для лавсановых прокладок величина $R_{к.р}$ лежит в пределах $(0{,}6 \div 1{,}0)$ °C/*вт*.

Тепловое сопротивление радиатор—окружающая среда $R_{р.с}$ зависит главным образом от величины радиатора и качества обработки его поверхности.

Поверхность радиатора практически всегда значительно больше поверхности полупроводникового прибора, поэтому можно считать $R_{к.с} \gg (R_{к.р} + R_{р.с})$. Тогда $R_{к.с.общ} \approx R_{к.р} + R_{р.с}$ и общее тепловое сопротивление между переходом и окружающей средой определяется следующим образом:

$$R_{п.с.общ} \approx R_{п.к} + R_{к.р} + R_{р.с}.$$

Тепловые сопротивления между поверхностью корпуса или радиатора и окружающей средой определяются из следующих уравнений:

$$R_{к.с} = \frac{1}{\alpha S_{пр}} \quad \text{и} \quad R_{р.с} = \frac{1}{\alpha S_р},$$

Таблица 6

Значения теплового сопротивления $R_{п.к}$ для некоторых полупроводниковых приборов

Тип прибора	$R_{п.к}$, °C/*вт*	Тип прибора	$R_{п.к}$, C°/*вт*
П302—П306	10	КТ801А—КТ801Б	20
П209—П210	1,0	КТ802А	2,5
ГТ403А, ГТ403Б		КТ805А—КТ805Б	3,3
ГТ403Г, ГТ403Д	15	КТ903А—КТ903Б	3,33
ГТ403Ж, ГТ403И		П701—П701Б	10
ГТ403В, ГТ403Е	12	П702—П702А	2,5
П601—П609	15	П201М—П203М	4,0
ГТ804А—ГТ804В	3	П213—П214Г	4,0
КТ602А—КТ602Г	45	Д214—Д215	1,5—40,0
КТ604А—КТ604Б	40	Д235	8,0
П4А—П4Д	2,0	Д238	3,0
ГТ701А	1,2	ВКУ-10	2, 2

где $S_{пр}$ — полная поверхность прибора, *м*²; $S_р$ —поверхность радиатора, *м*²; a — коэффициент теплоотдачи, *вт*/(*м*²·°C).

Зависимость температуры перехода полупроводникового прибора при заданных рассеиваемой мощности и температуре окружающей среды от тепловых сопротивлений определяется по формуле

$$t_п = t_с + P(R_{п.к} + R_{к.с}).$$

Глава вторая

РАСЧЕТ РАДИАТОРОВ

Общие сведения

Существует несколько типов радиаторов для полупроводниковых приборов (рис. 12). Из них наибольшее распространение получили пластинчатые, ребристые и штырьковые.

Наиболее простым радиатором является пластинчатый, представляющий собой прямоугольную или круглую металлическую пластину толщиной от 1 до 8 *мм* (рис. 12, *а*). Пластинчатые радиаторы

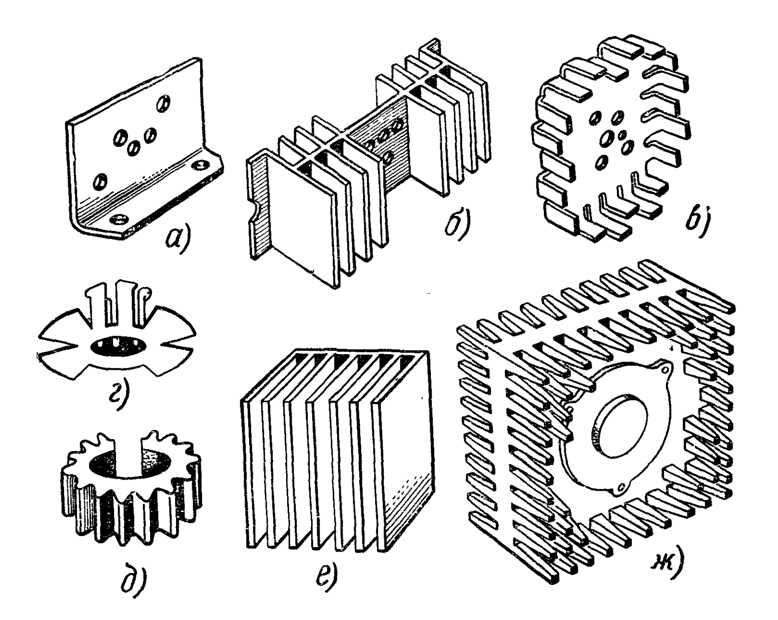


Рис. 12. Конструкции теплоотводящих радиаторов.
а—пластинчатый; *б*—с продольным расположением ребер; *в*—с зигзагообразным расположением ребер; *г*—крыльчатый; *д*—звездообразный; *е*—ребристый; *ж*—штырьковый

целесообразно использовать для рассеяния небольших мощностей. Для уменьшения занимаемого места пластинчатым радиаторам придается различная конфигурация. Для отвода большого количества тепла пластинчатый радиатор непригоден из-за чрезмерного увеличения его размеров и малой эффективности. Основное достоинство пластинчатого радиатора — простота изготовления.

Из сложных конструкций радиаторов более распространены ребристые радиаторы (рис. 12, *б—е*). Они могут быть с вертикальным или горизонтальным расположением ребер, иметь круглую или прямоугольную форму. Прямоугольные ребристые радиаторы могут быть как с односторонним, так и с двусторонним оребрением.

Штырьковый радиатор (рис. 12, *ж*) сложнее в изготовлении, чем ребристый, однако он более эффективен в работе. Штырьковый радиатор изготовляется методом литья или фрезерования. Этот тип радиаторов работает эффективнее при горизонтальном расположении штырей. Делать такой радиатор в любительских условиях нецелесообразно.

Выбор того или другого типа радиатора и его конструкции определяется в каждом конкретном случае различными факторами: мощностью рассеивания, конструктивными требованиями к радиоэлектронному устройству, условиями эксплуатации устройства, а также возможностями радиолюбителя.

Расчет радиаторов начинают с определения поверхности теплообмена $S_р$, которая зависит от мощности P, рассеиваемой полупроводниковым прибором, разности температур $\theta_{р.с}$ между радиатором и окружающей средой и значения коэффициента теплоотдачи α.

Исходя из максимально допустимых значений температур *p-n*-перехода, мощности P, рассеиваемой полупроводниковым прибором, и теплового сопротивления переход — корпус $R_{п.к}$ для выбранного типа полупроводникового прибора, определяют максимально допустимую температуру корпуса $t_{к.\,макс}$:

$$t_{к.\,макс} = t_п - P R_{п.\,к}.$$

Для некоторых типов полупроводниковых приборов значения $t_п$ и $t_к$ приведены в табл. 7. В случае когда $R_{п.к}$ неизвестно, величину $t_{к.\,макс}$ можно принять равной 60 °С для германиевых и 100 °С для кремниевых полупроводниковых приборов.

Таблица 7

Значения предельных температур $t_п$ и $t_к$ для некоторых полупроводниковых приборов

Тип прибора	$t_п$ ($t_к$), °С	Тип прибора	$t_п$ ($t_к$), °С
ГТ402—ГТ403Ж		КТ805А—КТ805Б	150
П601—П606	85	КТ802А—КТ902А	
П607—П609		КТ903А—КТ903Б	115
ГТ804А—ГТ804В	65	П4А—П4Д	90
П210Б—П210В	70	КД202А—КД202Е	(130)
П302—П306А	120	Д242—Д242Б	(130)
КТ601А	150	Д302—Д305	(70)
КТ602А—КТ602Г	120	Д302А—Д303А	(55)
КТ604А—КТ604Б		Д229В—Д229Е	(85)
КТ605А—КТ605Б	150		
КТ801А—КТ801Б			

Мощность, рассеиваемая транзистором, в общем случае складывается из мощностей, рассеиваемых *p-n*-переходами:

$$P = P_к + P_э = I_к U_к + I_э U_э,$$

где напряжения коллектора $U_к$ и эмиттера $U_э$ измерены относительно базы.

Для транзисторов, работающих в усилительном режиме, при практических расчетах можно считать:

$$P \approx P_к = I_к U_к.$$

Мощность, рассеиваемая транзистором при работе в импульсном режиме, может быть ориентировочно определена из выражения

$$P \approx 0{,}5\, U_{к.\,э}\, I_{к\, m} + 0{,}33\, U_{п}\, I_{к\, m} \frac{\tau}{T},$$

где $U_{к.\,э}$ — падение напряжения на участке коллектор—эмиттер в режиме насыщения; $I_{к\, m}$ — амплитуда тока коллектора; $U_{п}$ —напряжение источника питания; τ — длительность фронта импульса; T — период следования импульсов.

Разность температур $\theta_{к.\,р}$ между корпусом полупроводникового прибора и радиатором находится по формуле

$$\theta_{к.\,р} = P R_{к.\,р}.$$

Расчет средней температуры поверхности радиатора t_s производится по формуле

$$t_s = 0{,}96\,[t_{п} - P\,(R_{п.\,к} + R_{к.\,р})].$$

Разность температур между поверхностью радиатора и окружающей средой $\theta_{р.\,с}$ определяется из соотношения

$$\theta_{р.\,с} = t_s - t_{с}.$$

Для ребристого радиатора значение величины $\theta_{р.\,с}$ находится отдельно для наружных и внутренних поверхностей, т. е. учитывается увеличение (по сравнению с окружающей) температуры среды между ребрами. Для наружных поверхностей значения р. с находятся по ранее приведенной формуле, а для внутренних поверхностей радиатора — по формуле

$$\theta_{р.\,с} = t_s - t_{i\,с},$$

где $t_{i\,с}$ — температура среды между ребрами, °С.

Величина $t_{i\,с}$ определяется из выражения

$$t_{i\,с} = t_s - (t_s - t_{с})\,k,$$

где k — коэффициент, определяемый через вспомогательный коэффициент η и равный

$$\eta = k_1\, b \left(\frac{t_s - t_{с}}{l}\right)^{1/4}.$$

Здесь: b — расстояние между ребрами, *мм*; k_1 — коэффициент, учитывающий свойства окружающей среды при температуре $t_m = 0{,}5\,(t_s + t_{с})$ Значения коэффициента k_1 приведены в табл. 8. Зависимость k от η представлена в табл. 9.

Таблица 8

Зависимость коэффициента k_1 от t_m

t_m, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80	100	120	140	160	180
k_1	0,395	0,375	0,360	0,350	0,335	0,325	0,315	0,303	0,293	0,280	0,260	0,250	0,235	0,225

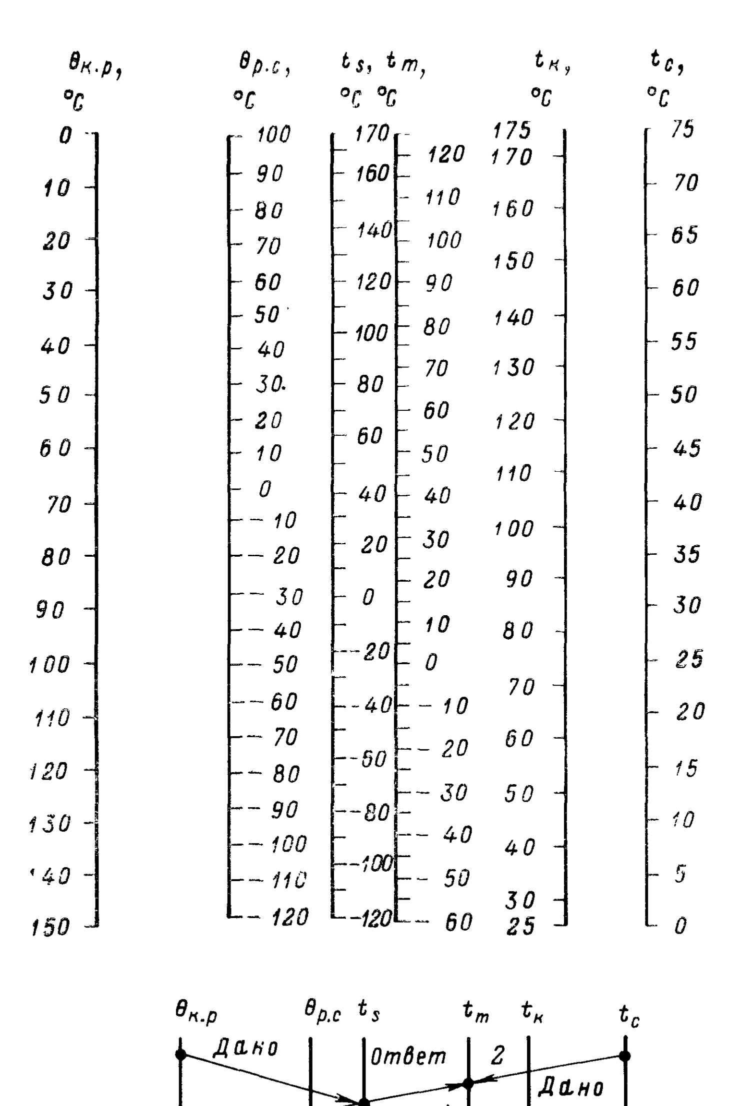


Рис. 13. Номограмма для определения величин t_s, $\theta_{р.\,с}$ и t_m.

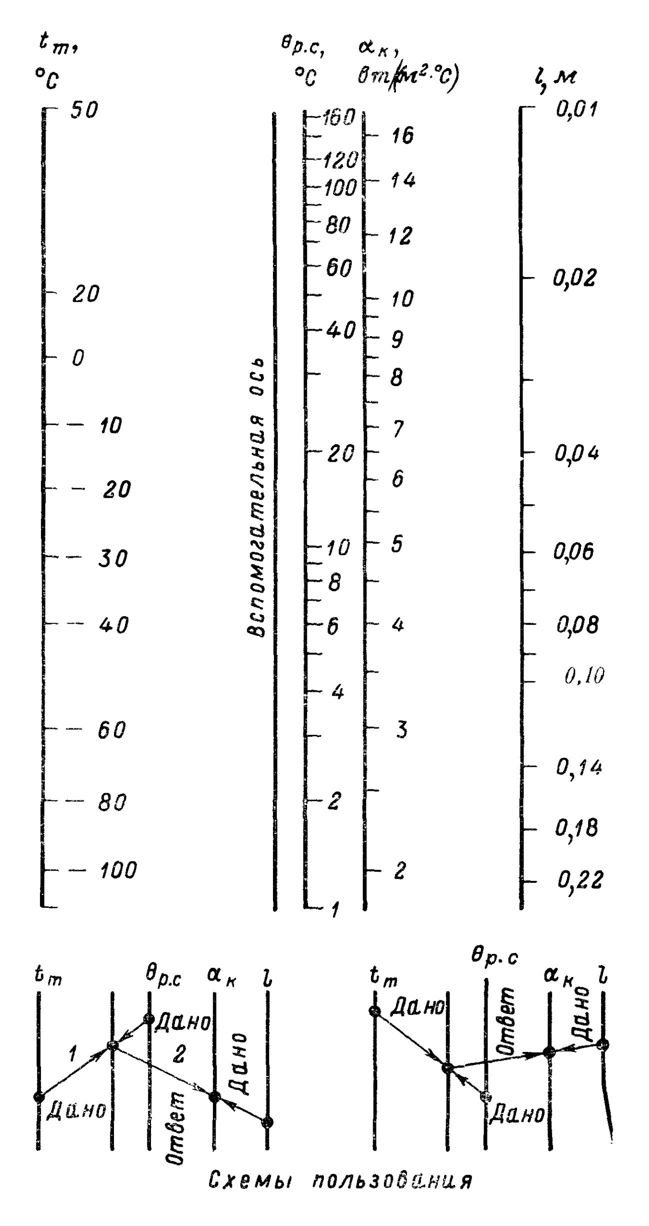


Рис. 14. Номограмма для определения конвективного коэффициента теплоотдачи α .

Зависимость коэффициента k от η

η	0	0,2	0,5	0,8	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
k	0	0,095	0,245	0,390	0,480	0,680	0,815	0,895	0,935	0,960	0,980

На рис. 13 приведена номограмма для определения средней температуры поверхности радиатора t_s, разности температур между радиатором и окружающей средой $\theta_{р.с}$ и средней температуры t_m.

При расчете может оказаться, что величина $\theta_{р.с}$ примет отрицательные значения. Это означает, что тепловой поток при данных условиях направлен не от радиатора, а наоборот. Не продолжая дальнейшего расчета, следует откорректировать исходные данные.

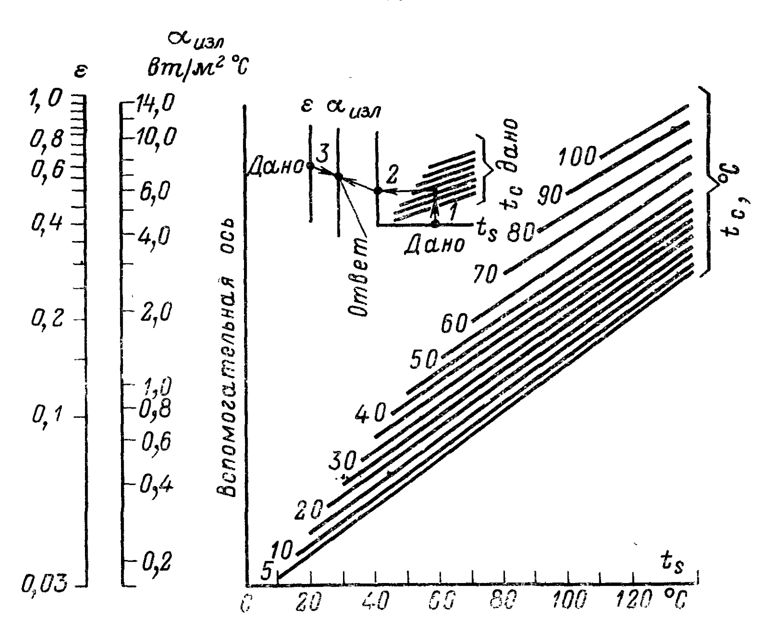


Рис. 15. Номограмма для определения лучистого коэффициента теплоотдачи $\alpha_л$.

Используя полученные значения $\theta_{р.с}$, t_m и задавшись длиной радиатора l, рассчитывают коэффициент теплоотдачи конвекцией $\alpha_к$ по формулам, приведенным в гл. 1, или по номограмме (рис. 14).

По номограмме на рис. 15 или по формулам, приведенным в гл. 1, определяется коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием $\alpha_л$.

Расчет поверхности теплообмена радиатора и его геометрических размеров

Для обеспечения заданного теплового сопротивления $R_{п. с}$ радиатор в виде квадратной алюминиевой пластины без отделки поверхности, расположенной вертикально и свободно обтекаемой воздухом с обеих сторон, должен иметь площадь

$$S_р = \frac{800}{R_{р. с}}, \ см^2.$$

Толщина пластины должна быть не менее $^1/_{40}$—$^1/_{50}$ ее длины (ширины). Примерно такую же площадь должен иметь радиатор, изготовленный из кадмированной стали.

Алюминиевая пластина с отпескоструенной, матированной поверхностью, а также медная могут иметь площадь на 30—40% меньше.

Тепловую характеристику пластинчатого радиатора, поверхность теплообмена или общую мощность рассеяния можно рассчитать по формуле

$$S_р = \frac{P}{\alpha\, \theta_{р. с}}, \ м^2.$$

Площадь радиаторной пластины при этом равна $S_р/2$. Площадь, занимаемая

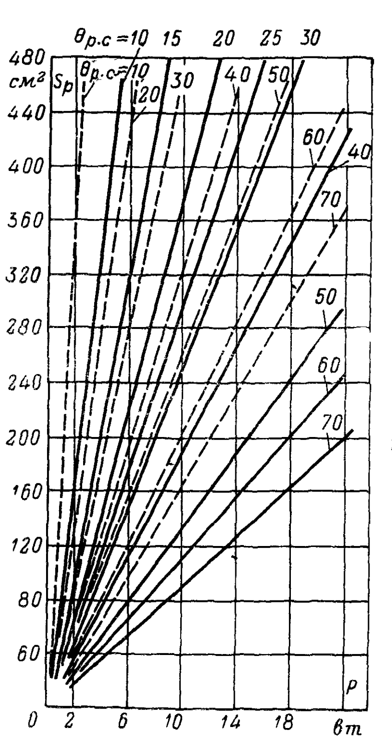


Рис. 16. График для определения поверхности теплообмена пластинчатого радиатора.

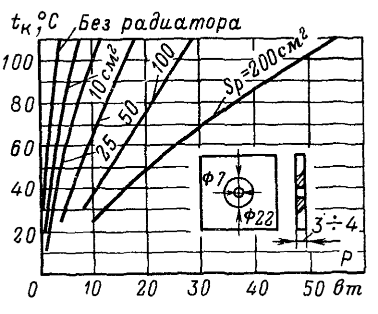


Рис. 17. Зависимости температуры $t_к$ полупроводниковых диодов Д242, Д243, Д245 от величины рассеиваемой мощности и площади пластинчатого радиатора.

полупроводниковым прибором, не вычитается из общей поверхности теплообмена.

Ориентировочную поверхность теплообмена для пластинчатого радиатора с учетом $\alpha_л$ (при $\varepsilon=0{,}9$ на графике сплошные линии) и

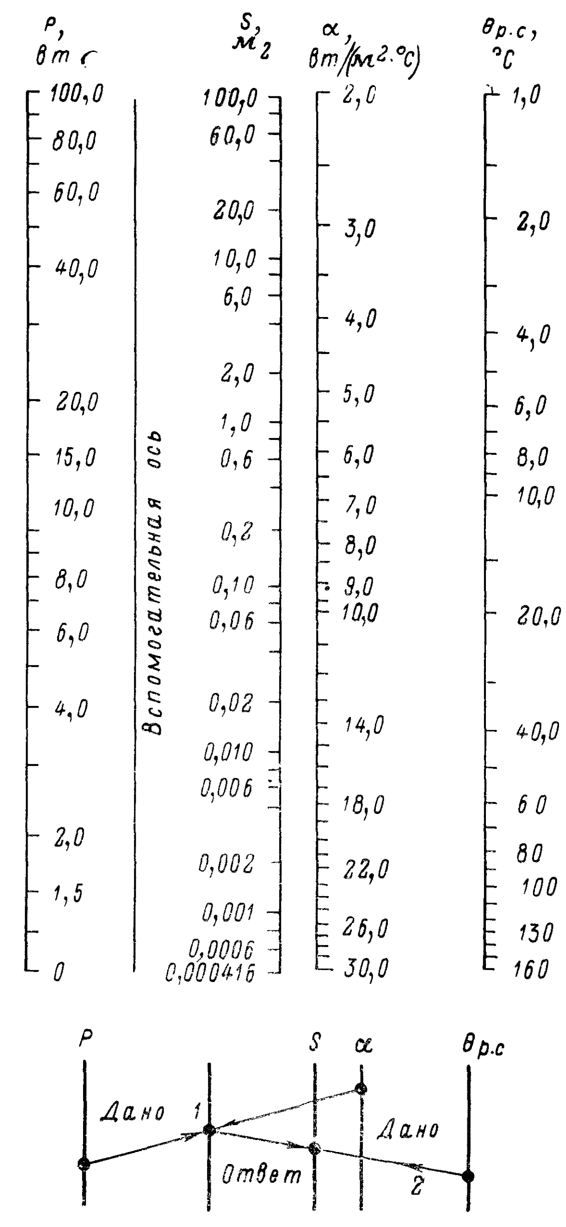


Рис. 18. Номограмма для определения поверхности теплообмена ребристого радиатора.

без его учета (пунктирные линии) можно определить по графику на рис. 16. График построен для пластины толщиной не менее 2—3 *мм.*

На рис. 17 показана зависимость температуры корпуса полупроводниковых диодов Д242, Д243, Д245 от величины рассеиваемой мощности и площади пластинчатого радиатора $S_р$.

Переход от плоской к оребренной поверхности целесообразен при выполнении неравенства $\beta<1$:

$$\beta = \alpha \frac{\delta/2}{\lambda},$$

где α — коэффициент теплоотдачи; δ — толщина ребра радиатора; λ — коэффициент теплопроводности материала радиатора.

Расчет площади поверхности теплообмена ребристого радиатора аналогичен расчету площади пластинчатого радиатора. На рис. 18 показана номограмма для определения площади теплообмена радиатора $S_р$ по предварительно рассчитанным величинам $\theta_{р.с}$ и α. Геометрические размеры ребристого радиатора определяются в следующем порядке (рис. 19).

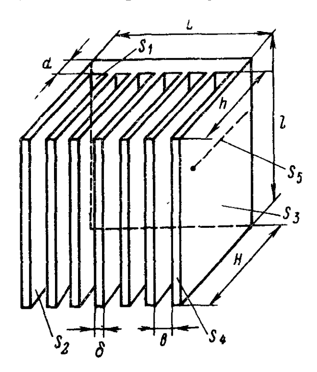


Рис. 19. Определяющие размеры ребристого радиатора.

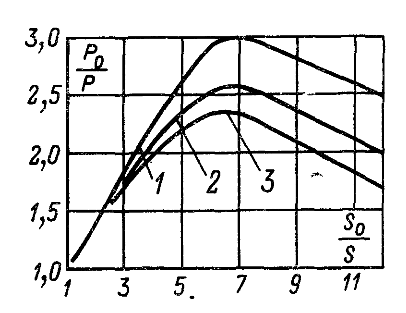


Рис. 20. Зависимость рассеиваемой ребристым радиатором мощности от числа ребер.

Кривые *1, 2* и *3* соответствуют значениям l=13, 25 и 38 *см.*

Исходя из конструктивных соображений, задается высота ребра радиатора h, которая не должна быть больше 30—40 *мм.* Задавшись величиной b/h в пределах 0,3—0,7, определяют расстояние между ребрами b. Выбрав толщину ребра δ и толщину плиты основания радиатора d, определяют площади $S_А$ и $S_Б$:

$$S_А = 2\,[(l+\delta)(h+d) + l\,(b+d) + bd] - dl;$$
$$S_Б = 2\,[(l+\delta)(h+d) + l\,\delta] - dl.$$

Число ребер определяется по формуле

$$n = \frac{S_Р - S_Б}{S_А} + 1.$$

Ширина радиатора равна

$$L = (n-1)\,(b+\delta) + \delta.$$

Число ребер радиатора находится в прямой связи с его габаритами. Увеличение числа ребер на поверхности неизменных размеров не может привести к увеличению рассеиваемой мощности, так как уменьшение расстояния между ними приводит к увеличению температуры среды между ребрами. При этом уменьшается теплоотдача конвекцией и излучением.

Зависимость рассеиваемой радиатором мощности от числа ребер показана на рис. 20. Здесь по оси абсцисс отложены отношения площадей оребренной S_0 и неоребренной S поверхностей, а по оси ординат — отношения мощностей, рассеиваемых оребренной P_0 и неоребренной P поверхностей при $t_s - t_c = 20°C$. Из графика видно, что с увеличением числа ребер (с ростом S_0/S) рассеиваемая радиатором мощность сначала растет, а затем падает.

Для ребер существует зависимость расстояния между ребрами b от их числа n

$$n = \left(\frac{S_0}{S} - 1\right)\frac{L}{2h}; \qquad b = \frac{L - n\delta}{n-1}.$$

При необходимости определить мощность, которую способен рассеять радиатор с заданными геометрическими размерами, следует найти величины каждой из поверхностей теплообмена S_1, S_2, S_3, S_4 и S_5 (см. рис. 19):

$$S_1 = (n-1)\,b\,l;$$

$$S_2 = 2\,(n-1)\,h\,l;$$

$$S_3 = 2\,h\,l;$$

$$S_4 = n\,\delta\,(l + 2h) + 2\,(H - h)\,L;$$

$$S_5 = L\,l.$$

Зная коэффициент теплоотдачи α для каждой i-й поверхности, легко определить рассеиваемую ею мощность по формуле

$$P_i = \alpha_i\,\theta_{р.\,с}\,S_i.$$

При этом суммарная мощность равна:

$$P_{общ} = P_{i1} + P_{i2} + \ldots + P_{in}.$$

При расчете штырькового радиатора принимается, что все тепло, которое необходимо отвести от полупроводникового прибора, рассеивается штырями.

Теплоотдача штыря переменной толщины равна:

$$P_{шт} = 1{,}14\,\theta_{р.\,с}\,\mathrm{th}\,(\beta_0 h)\sqrt{\alpha\,u\,\lambda\,f}\,,\ вт,$$

где α — коэффициент теплоотдачи, *вт*/(*м*$^2\cdot$°C); h — высота штыря (рис. 21, *а*), *м*; u—периметр поперечного сечения штыря (среднего по высоте), *м*; f — площадь поперечного сечения штыря (среднего по высоте), *м*^{2}; β_0 — коэффициент:

$$\beta_0 = \sqrt{\frac{4\alpha}{\lambda\,D_{экв}}}; \qquad D_{экв} = 2\sqrt{\frac{a_3^2}{\pi}} \quad (\text{рис. 21, } a);$$

λ — коэффициент теплопроводности материала радиатора, *вт*/(*м*$\cdot$°C).

Для штырей, имеющих форму стержней постоянной толщины, из формулы исключается коэффициент 1,14.

Для штырькового радиатора величина $\theta_{р.с}$ связана со средней температурой окружающего воздуха равенством

$$\theta_{р.\,с} = t_s - \frac{t_c + (t_s - 3)}{2}.$$

Формула верна для естественной конвекции воздуха.

Общее количество штырей радиатора равно:

$$n = P/P_{ш.г}.$$

Площадь радиаторной плиты определяется из выражения

$$S_{пл} = S_з n + S_{пр},$$

где $S_з$ — площадь одного заштрихованного квадрата (рис. 21,*б*), *м*²; $S_{пр}$ — площадь, занимаемая полупроводниковым прибором на радиаторе, *м*².

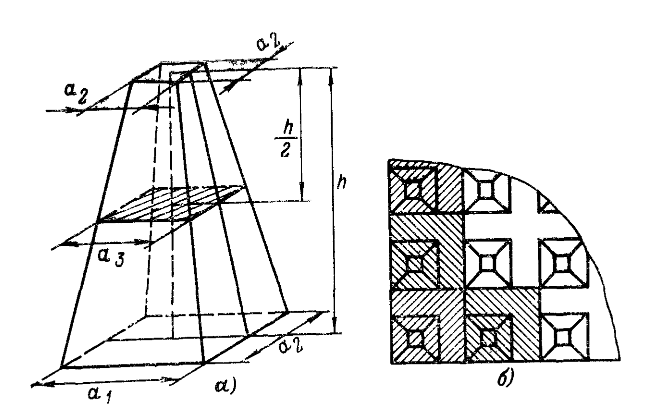


Рис. 21. Деталь штырькового радиатора.
а—штырь; *б*—расположение штырей на пластине.

Из конструктивных соображений размеры радиаторной пластины для штырькового радиатора не должны превышать 150×150 *мм*, а высота штыря 40 *мм*.

При ограниченном объеме радиоэлектронного устройства, в котором устанавливается штырьковый радиатор, рекомендуется произвести уточняющий расчет радиатора с учетом поверхностей, не занятых штырями.

Следует отметить, что оребрение радиаторов следует применять при мощностях рассеяния больше 5 *вт* и температуре окружающей среды выше 60—70 °С. При расчетах следует принимать следующие оптимальные размеры оребренных радиаторов: толщина основания $d = 3 \div 5$ *мм*; высота ребер $h = 10 \div 40$ *мм*, толщина ребер $\delta = 1{,}5 \div 3$ *мм*; расстояние между ребрами $b = 7 \div 10$ *мм*.

Для обеспечения равномерного нагрева радиатора его длину и ширину целесообразно выбирать близкими по величине.

Глава третья

ИЗГОТОВЛЕНИЕ РАДИАТОРОВ

Материалы для радиаторов

Радиаторы для полупроводниковых приборов могут быть изготовлены из стали, меди, алюминия и его сплавов, магниевых сплавов и т. п.

Одними из наиболее распространенных материалов, применяемых для изготовления радиаторов, являются алюминий и его сплавы. Простота и легкость обработки, возможность наносить химическим и электрохимическим путем защитные покрытия, высокая теплопроводность (табл. 10) и ряд других достоинств обусловили широкое применение алюминия и его сплавов для изготовления радиаторов.

Таблица 10

Коэффициенты теплопроводности некоторых материалов

Наименование материала	λ, *вт/(м·°С)*	Наименование материала	λ, *вт/(м·°С)*
Алюминий	210	Сталь У-12	45—46
Дюралюминий	160—180	Сталь 20	50
Латунь	100—120	Медь	380—400
Серебро	390—410	Бекелитовый лак	0,3
Свинец	35	Слюда	0.47—0,48

В зависимости от количества примесей различают несколько марок алюминия. Наиболее распространенные из них АВ0000, АВ000, АВ00, АВ0, А00, А0, А1, А2 и А3. Алюминий первых пяти марок применяется для изготовления алюминиевых сплавов, а также для их плакирования. Алюминий последних четырех марок обладает высокой пластичностью, хорошо обрабатывается и может применяться для изготовления радиаторов методами клепки и пайки.

Наиболее распространенными сплавами алюминия являются АЛ1, АЛ2, АЛ4, АЛ5, АЛ8, АЛ12, АК2 АК4, АК6 и АК8.

Широко известны сплавы алюминия с медью (дюралюминий). Наиболее типичным среди них является сплав Д1. К этой же группе относятся сплавы Д6 и Д16, обладающие более высокой прочностью, чем сплав Д1.

Для изготовления радиаторов применяются медь и ее сплавы. Медь обладает наивысшей после серебра теплопроводностью. Следует отметить, что чистая медь довольно дорога, поэтому применять ее для изготовления радиаторов нужно только в исключительных случаях.

Сплавы меди с оловом и легирующими присадками именуются бронзами. В зависимости от легирующих элементов бронзы носят специальные названия: алюминиевая бронза, фосфористая бронза и др.

Сплав меди с цинком носит название латуни. Латунь хорошо поддается механической обработке, пайке, лужению и гальванизации.

Бронза и латунь обладают хорошей теплопроводностью, что обусловлено медной основой этих сплавов.

Изготовление радиаторов

Изготовление пластинчатых радиаторов не представляет особых трудностей. Для изготовления радиаторов этого типа применяют материалы с высоким коэффициентом теплопроводности. Наилучшими материалами являются листовые медь толщиной 2—5 *мм* и алюминий толщиной 2,5—8 *мм*. Для уменьшения занимаемой площади радиаторам этого типа придается различная конфигурация (рис. 22).

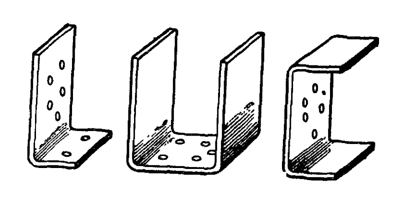


Рис. 22. Пластинчатые радиаторы.

Ребристые радиаторы могут быть изготовлены методами клепки, пайки, фрезеровки и литья. Наиболее доступными методами в любительских условиях являются два первых.

Методом клепки можно изготавливать как односторонние ребристые радиаторы, так и двусторонние. Для изготовления радиаторов этим способом пригодны любые материалы с хорошей теплопроводностью толщиной от 1 до 4 *мм*.

Для изготовления радиатора из выбранного материала вырезают заготовки, представляющие собой пластины прямоугольной формы. Затем заготовкам придают необходимую конфигурацию и производят тщательную зачистку соприкасающихся поверхностей. Необходимо проследить, чтобы на соприкасающихся поверхностях не было крупных раковин, царапин, заусенец и т. п. После этого все заготовки собирают вместе и производят клепку. На рис. 23 показаны некоторые приемы клепки. Для клепки применяются различные типы заклепок, которые могут различаться размерами, конфигурацией, формой головок и пр. Для изготовления радиаторов желательно применять цилиндрические заклепки с полукруглой головкой. Длина заклепки выбирается такой, чтобы ее хватило как для соединения заготовок радиатора, так и для образования замыкающей головки, обеспечивающей достаточную прочность соединения. Желательно, чтобы расстояние между головками заклепок после окончания клепки не превышало 5 диаметров стержня заклепки. На рис. 24 показаны конструкции радиаторов, изготовляемых методом клепки.

При клепке следует избегать непосредственного соединения разнородных металлов, так как некоторые пары металлов являются несовместимыми. При повышенной влажности в месте их касания образуются недопустимые гальванические пары, вызывающие усиленную коррозию металлов. По этой причине рекомендуется заготовки радиаторов и заклепки делать из однородных или совместимых металлов. В табл. 11 приведены совместимые и несовместимые пары

металлов, которые могут применяться для изготовления радиаторов. В этой таблице приняты следующие обозначения: С—совместимые пары, Н—несовместимые пары, П—совместимые пары при пайке мяг-

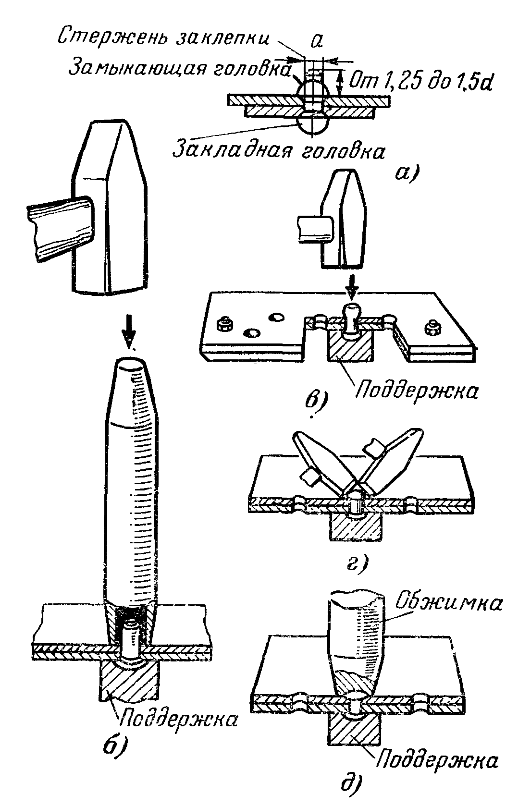


Рис. 23. Некоторые приемы клепки.

кими припоями на основе олова, но несовместимые при непосредственном соприкосновении.

Методом пайки можно изготавливать радиаторы, аналогичные клепаным. Пайка радиаторов может осуществляться с помощью паяльников, паяльных ламп, газовых горелок и пр.

Для соединения деталей радиатора могут быть применены мягкие и твердые припои. Для пайки больших поверхностей из меди, латуни, бронзы и оцинкованного железа желательно применять припой ПОС-18. Для пайки небольших радиаторов из меди или латуни применяется припой ПОС-30. Для получения высокой чистоты поверхности в месте пайки применяется припой ПОС-90. Перечисленные припои относятся к мягким припоям. Кроме них иногда применяются твердые припои с температурой плавления выше 550°С. Эти припои отличаются более высокой механической прочностью по срав-

нению с мягкими припоями. Пайка твердыми припоями осуществляется с помощью паяльных ламп или газовых горелок. В табл. 12 при-

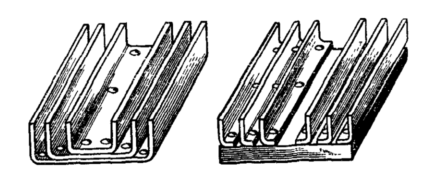


Рис. 24. Радиаторы, изготовленные методом клепки.

ведены наиболее легкоплавкие твердые припои, которые могут применяться для пайки радиаторов.

Таблица 11

Совместимость металлов

Металлы	Алюминий	Бронза	Дюралюминий	Латунь	Медь	Никель	Олово	Сталь нелегированная	Хром	Цинк
Алюминий . .	С	Н	С	Н	Н	Н	Н	С	Н	С
Бронза . . .	Н	С	Н	С	С	С	П	Н	С	Н
Дюралюминий .	С	Н	С	Н	Н	Н	Н	С	Н	С
Латунь . . .	Н	С	Н	С	С	С	П	Н	С	Н
Медь . . .	Н	С	Н	С	С	С	П	Н	С	Н
Никель . . .	Н	С	Н	С	С	С	П	С	—	С
Олово . . .	Н	П	Н	П	П	П	С	С	—	С
Сталь нелегированная .	С	Н	С	Н	Н	С	С	С	С	С
Хром . . .	Н	С	Н	С	С	—	—	С	С	С
Цинк . . .	С	Н	С	Н	Н	С	С	С	С	С

Радиаторы можно изготовить методом внутренней пайки с помощью паяльных паст следующего состава:

2. Олово (порошок) 18 в. ч.
Глицерин 48 в. ч.
Флюс ЛТИ-120 2 в. ч.

2. Олово (порошок) 54 в. ч.
Вазелин технический 31 в. ч.
Канифоль 14 в. ч.
Флюс ЛТИ-120 1 в. ч.

Таблица 12

Твердые припои

Основные компоненты, %	Температура плавления, °С	Применение
Медь — 15,5; серебро — 60; кадмий — 8; цинк— 16,5	630	Легкоплавкая медь, сталь
Серебро — 1,5; олово — 55; цинк — 43,5	500	Латунь, луженое железо

Для приготовления пасты все твердые компоненты измельчают до консистенции пудры. Затем все компоненты тщательно смешиваются и полученная паста наносится на зачищенные места спаиваемых поверхностей. Детали прижимают одну к другой и нагревают до температуры 300°С.

В качестве флюсов для пайки радиаторов из меди, латуни и бронзы применяют канифоль, флюсы КЭ, ЛТИ-1, ЛТИ-115, ЛТИ-120 и др. При пайке мягкими припоями предпочтение нужно отдавать высокоактивным флюсам ЛТИ-1, ЛТИ-115 и ЛТИ-120. Применение этих флюсов обеспечивает чистую и прочную пайку даже при незачищенных и необезжиренных поверхностях спаиваемых деталей. Их данные приведены в табл. 13. Для приготовления флюсов все компоненты смешиваются в той последовательности, в какой они приведены в таблице.

Таблица 13

Флюсы для пайки мягкими припоями

Наименование	Состав, %	Применение	Примечание
Флюс КЭ	Канифоль — 15; этиловый спирт — 85	Пайка меди, латуни и бронзы	Остатки флюса смыть спиртом
Флюс-паста	Канифоль — 16; хлористый цинк — 4; вазелин технический—80	Пайка повышенной прочности для черных и цветных металлов	То же
—	Бура прокаленная —58; борная кислота—40; хлористый кальций—2	Пайка меди и латуни твердыми и мягкими припоями	Остатки флюса удалить

Наименование	Состав, %	Применение	Примечание
Флюс ЛТИ-1	Спирт-сырец 67 — 73; канифоль — 20—25; солянокислый анилин 3—7; триэтаноламин—2	Пайка почти всех металлов	Вентиляция при пайке. Остатки флюса смыть спиртом
Флюс ЛТИ-115	Спирт-сырец 63—74; канифоль 20—25; метафенилендиамин 3—5; триэтаноламин 1—2	То же	То же
Флюс ЛТИ-120	Спирт-сырец 63—74; канифоль 20—25; триэтаноламин 1—2; диэтиламин солянокислый 3—5	» »	Остатки флюса снимать не обязательно

Пайка радиаторов из алюминия и его сплавов требует применения специальных флюсов и припоев.

Для пайки алюминия и его сплавов используют паяльники с жалами из мягкой стали. Температура жала должна быть 500—550°С. Флюс для пайки наносится только на место, предназначенное непосредственно для пайки, так как он сильно воздействует на алюминий, вызывая его коррозию.

Для пайки алюминия и его сплавов применяются флюсы следующих составов:

для пайки мягкими припоями:

оливковое масло—50%;
канифоль—34%;
хлористый цинк—16%;

для пайки твердыми припоями:

хлористый калий—48%;
хлористый натрий—12%;
хлористый литий—15%;
хлористый цинк—12%;
хлористый магний—6%;
фтористый натрий—7%.

После подготовки деталей нагретым паяльником набирают припой, нагревают детали паяльником до 300—350°С (до начала выделения белых паров из алюминиевого флюса), а затем медленно двигают паяльником по месту спайки. В процессе пайки добавлять флюс не рекомендуется, так как это может вызвать его спекание и загрязнение места спайки.

Основные припои для пайки алюминия и его сплавов приведены в табл. 14.

Таблица 14

Припои для пайки алюминия

Марка	Состав, %	Температура плавления, °С
	Твердые припои	
ВПТ-3	Медь—25; кремний—6; алюминий—69	530
ПА-2	Медь—20; кремний—8; алюминий—72	530
А	Медь—2; цинк—58; олово—40	425
ВПТ-4	Алюминий—55; кремний—5; цинк—40	400
	Мягкие припои	
—	Цинк—24; олово—60; кадмий—16	275
—	Цинк—50; олово—45; алюминий—5	—
—	Цинк—25; олово—73; кадмий—2	—

Наиболее высококачественные радиаторы изготавливаются методом фрезерования или вытачивания на токарном станке. Изготовление радиаторов этими методами не представляет трудностей при наличии соответствующего оборудования. Поэтому технология изготовления радиаторов этими методами здесь не рассматривается. На рис.

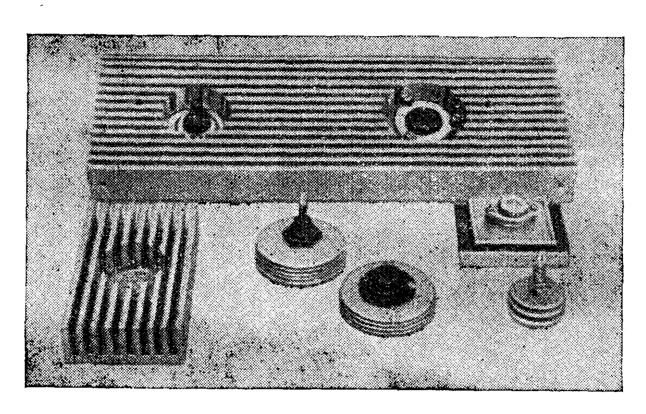


Рис. 25. Радиаторы, изготовленные на фрезерном и токарном станках.

25 показаны некоторые варианты радиаторов, изготовленных на фрезерном и токарном станках.

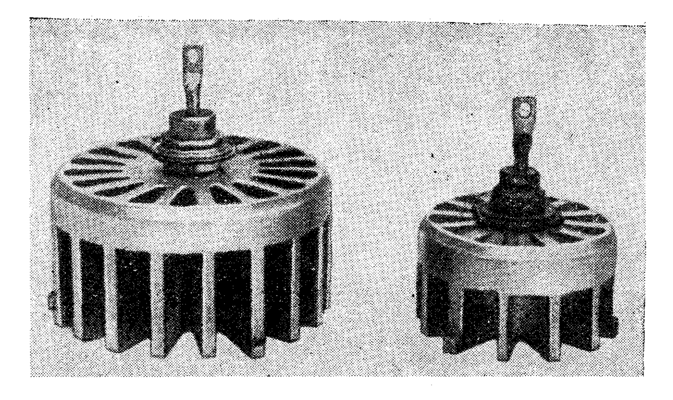


Рис. 26. Радиаторы от металлокерамических ламп.

В ряде конструкций для охлаждения мощных диодов можно использовать радиаторы от металлокерамических ламп типов ГИ-11, ГИ-12Б, ГИ-30, которые показаны на рис. 26.

Конструкции радиаторов для маломощных полупроводниковых приборов

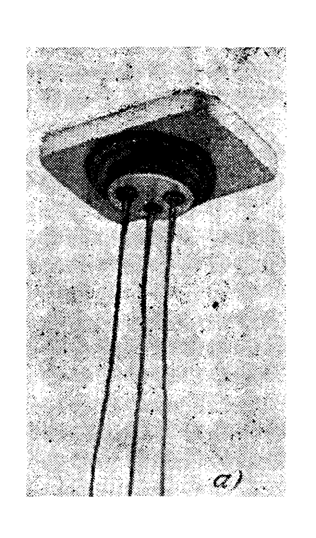
Применение дополнительных теплоотводов для маломощных полупроводниковых приборов оправдано в ряде случаев, когда необходимо увеличить их надежность по тепловому режиму. Кроме того, применение радиаторов позволяет увеличить мощность рассеяния маломощных транзисторов до 0,8—1,5 *вт*, а также увеличить токи маломощных полупроводниковых диодов в несколько раз.

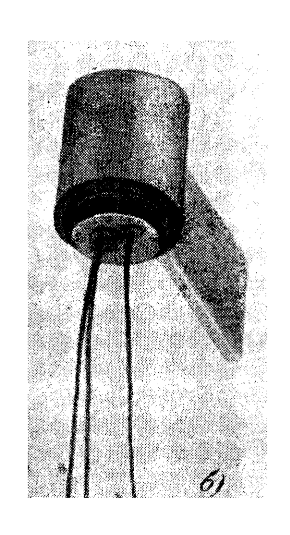
Радиаторы для маломощных транзисторов и полупроводниковых диодов могут иметь самые разнообразные конструкции. Необходимо лишь, чтобы тепловое сопротивление $R_{к.с}$ было минимальным. На рис. 27 показаны некоторые возможные типы радиаторов для маломощных транзисторов. Наиболее простыми являются радиаторы, изображенные на рис. 27, *а* и *б*. Для их изготовления пригодны медь, латунь, мягкая сталь и пр. толщиной 1—5 *мм*. На рис. 27, *в* показан более сложный, но и более эффективный радиатор, изготавливаемый из алюминия или меди.

Для обеспечения хорошего теплового контакта между теплоотводом и полупроводниковым прибором с последнего необходимо удалить краску, если она есть, а в зону контакта ввести минеральное масло или вазелин

Достаточно эффективные и простые радиаторы для маломощных полупроводниковых приборов можно изготовить из листового алюминия толщиной 0,8—1,5 *мм* или меди толщиной 0,5—0,8 *мм*. Предлагаемые радиаторы относятся к типу пластинчатых и позволяют получить мощность рассеяния до 1,5 *вт* применении транзисторов типов МП42Б, МП26Б и др. Однако не следует использовать маломощные транзисторы при мощности рассеяния свыше 500—700 *мвт*, так как дальнейшее повышение рассеиваемой мощности резко снижает их надежность.

Заготовка для одного из вариантов теплоотвода показана на рис. 28. Радиатор с указанными на чертеже размерами позволяет рассеивать мощность до 600—800 *мвт* с транзисторами типа МП42Б





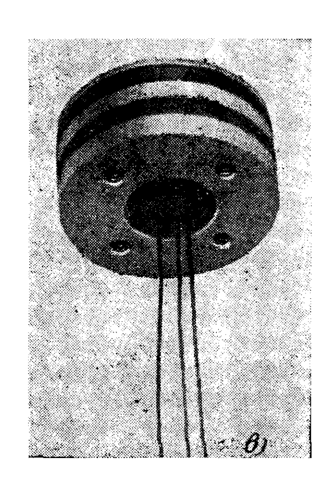


Рис. 27. Радиаторы для маломощных транзисторов.

На рис. 29 показаны транзисторы МП42Б и ГТ309Б, снабженные подобными радиаторами.

В конструкциях радиаторов, показанных на рис. 27, увеличение поверхности теплоотвода свыше 10 *см²* мало влияет на уменьшение

температуры перехода, так как тепловой поток от перехода проходит через сравнительно большое тепловое сопротивление. При этой конструкции радиаторов тепловой поток проходит по всему основанию

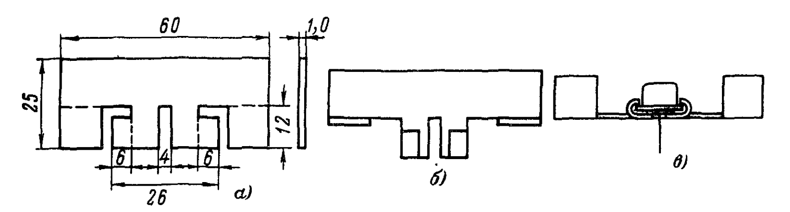


Рис. 28. Радиатор для маломощных транзисторов
а—заготовка; *б*—вид сверху; *в*—радиатор с транзистором.

корпуса транзистора, затем по стенке крышки корпуса и только тогда попадает в радиатор. От этих недостатков свободна конструкция,

Рис. 29 Установка маломощных транзисторов на радиаторы.

показанная на рис. 29. Здесь с целью уменьшения теплового сопротивления $R_{п. с}$ радиатор крепится к основанию транзистора. Другая разновидность радиаторов подобного типа показана на рис. 30. В этой конструкции сочетаются первые два типа радиаторов. В этом случае на корпус транзистора напрессовывается металлическая пластинка толщиной 3—4 *мм* с резьбовыми отверстиями. Напильником или шабером с основания транзистора снимаются краска и различные неровности. Затем транзистор становится основанием на радиа-

торную пластину с предварительно просверленными отверстиями под выводы прибора и крепление. Винтами М2,5—3 *мм* транзистор при-

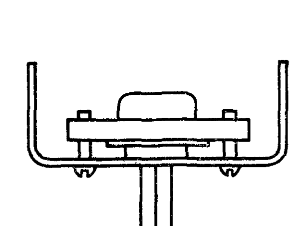
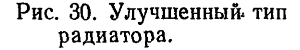



Рис. 30. Улучшенный тип радиатора.

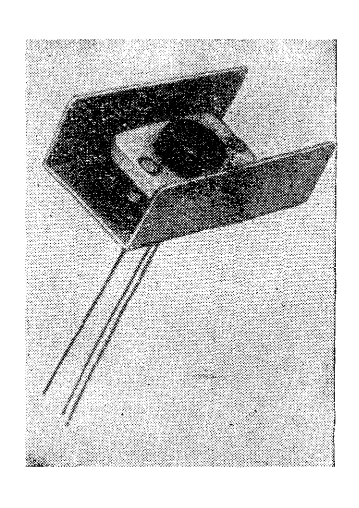


Рис. 31. Радиатор с установленным транзистором.

тягивается к нижней пластине. Нижняя пластина теплоотвода может иметь различные конфигурации, удобные для размещения транзистора в месте монтажа. Общий вид радиатора этого типа показан на рис. 31.

Описанные радиаторы с успехом могут быть использованы для маломощных полупроводниковых диодов (выпрямительных, стабилитронов и др.).

Обработка поверхности радиатора

Состояние поверхности радиатора оказывает большое влияние на его тепловое сопротивление. В табл. 15 приводятся данные по тепловому сопротивлению пластины площадью 100 $см^2$ и толщиной 2,5 *мм* в зависимости от состояния ее поверхности. Как видно из таблицы, обработанная соответствующим образом поверхность имеет меньшее тепловое сопротивление, чем необработанная.

Обработка поверхности может осуществляться механическим, химическим или электрохимическим способом.

Механическим способом осуществляются зачистка, шабрение и пескоструйная обработка. Зачистка осуществляется с помощью наждачных и стеклянных шкурок или абразивных порошков. Шабрение применяется для снятия окалин и излишков припоя после пайки.

При пескоструйной обработке на изделие направляют струю смеси сжатого воздуха с сухим кварцевым песком. Ударяясь о поверхность изделия, песчинки хорошо очищают ее и придают ей матовый оттенок и равномерную шероховатость.

Для пескоструйной обработки можно применять струю сжатого воздуха с влажным песком, а также со смесью воды и песка или другого абразива.

Таблица 15

Зависимость теплового сопротивления $R_{к.с}$ от состояния поверхности радиаторной пластины

Материал	Поверхность	$R_{к·с}$, °C/*вт*
Алюминий	Без специальной обработки	7,7
Сталь	Кадмированная	7,7
Медь	Без специальной обработки	5,8
Медь	Пескоструйная	5,3
Алюминий	Пескоструйная матированная	4,8
Медь	Пескоструйная черненая	4,6

В любительских условиях пескоструйную обработку радиаторов можно осуществить на установках, используемых для пескоструйной очистки зданий, памятников и т. п.

Для увеличения отвода тепла от радиатора за счет излучения применяется чернение материала радиатора. Чернение стали, меди, латуни и бронзы может быть осуществлено электрохимическим способом. Раствор, в котором производится окрашивание, состоит из следующих компонентов:

медный купорос—60 *г/л;*
сахар (рафинад)—90 *г/л;*
едкий натр—45 *г/л;*
углекислый натрий—20 *г/л.*

Сначала растворяют медный купорос в $^1/_4$ воды полного объема, затем в полученный раствор добавляют сахар. Отдельно в таком же количестве воды растворяют едкий натр и к нему небольшими порциями доливают раствор медного купороса с сахаром. После смешивания растворов доливают остальную воду и добавляют углекислый натрий.

Зачищенную и отполированную деталь в течении 5—10 *мин* обезжиривают в следующем растворе:

едкий натр (или калий)—
100 *г/л;*
силикатный клей—2 *г/л.*

После обезжиривания деталь промывают в теплой воде.

К детали подключают минус источника постоянного тока напряжением 4—6 *в*. Плюс источника тока подключают к аноду, которым служит лист красной меди. Вес анода должен быть равен весу детали. При подключенном источнике тока сначала в раствор опускают медный анод, а затем деталь.

Через 5—10 *сек* источник тока отключают, и процесс окрашивания происходит самостоятельно. Он длится около 2—3 *мин.*

Радиаторы из латуни можно окрасить в черный цвет при погружении его на 1—3 *мин* в следующий раствор:

25%-ный нашатырный спирт—500 *г*;

двууглекислая (или углекислая) медь—60 *г*;

латунь (опилки) — 0,5 *г*.

После смешивания компонентов раствор энергично взбалтывают 2—3 раза, после чего в него опускают деталь.

Для чернения алюминия и его сплавов используют раствор и технологию, применяемые при глубоком анодировании алюминия, описанные далее. Применение лакокрасочных покрытий для чернения радиаторов не рекомендуется, так как эти покрытия имеют низкий коэффициент теплопроводности.

Рекомендации по изготовлению радиаторов

Независимо от конструкции радиатора чистота обработки поверхности, контактирующей с полупроводниковым прибором, должна быть не ниже $\bigtriangledown 6$—$\bigtriangledown 7$.

От чистоты обработки соприкасающихся поверхностей и удельного давления в зоне контакта полупроводникового прибора с радиатором зависит тепловое сопротивление $R_{к.р}$, определяющее температуру радиатора и эффективность теплоотвода. Поэтому поверхность радиатора, контактирующая с полупроводниковым прибором, не должна иметь заусенец, раковин, царапин, выбоин и грязи.

Сверление в радиаторе отверстия, общего для всех выводов прибора, не допускается. Отверстия под каждый вывод сверлят отдельно и они должны быть возможно минимального диаметра.

Если радиатор служит для охлаждения одного полупроводникового прибора, последний следует располагать в центре теплоотвода. При установке нескольких полупроводниковых приборов на одном радиаторе их устанавливают с таким расчетом, чтобы мощность тепловых потерь была распределена по радиатору равномерно.

Для уменьшения теплового сопротивления $R_{к.р}$ в контактную зону вводится среда с теплопроводностью, близкой к теплопроводности металла. Для заполнения контактной зоны используются прокладки из мягких металлов, вязкие и порошкообразные вещества с хорошей теплопроводностью. В качестве вязких заполнителей возможно применение невысыхающих силиконовых масел, смазки ЦИАТИМ-201 или полиметилсиликсановых жидкостей.

Наиболее результативным способом уменьшения величины $R_{к.р}$ является заполнение контактной зоны расплавленным оловом. Для уменьшения величины $R_{к.р}$ полупроводниковый прибор можно припаять к поверхности теплоотвода, выполненной из меди, латуни, бронзы или стали, с помощью сплавов, имеющих низкую температуру плавления (60—80 °С). Для этой цели наиболее подходящими являются сплавы Вуда и д'Арсе с температурами плавления 60,5 и 79°С соответственно, имеющие следующий состав в процентах:

Сплав Вуда:

олово—12,5;

свинец—25;

висмут—50;

кадмий—12,5.

Сплав д'Арсе:

олово—9,6;

свинец—45,1;

висмут—45,3.

Для самостоятельного изготовления этих сплавов необходимо указанные компоненты расплавлять в той последовательности, в какой они приведены в тексте.

Чтобы не увеличивать сопротивление $R_{к.р}$, следует избегать электроизоляции полупроводникового прибора от радиатора. Лучше изолировать радиатор от шасси радиоэлектронного устройства, а полупроводниковый прибор крепить на теплоотводе без изоляции.

Если конструктивно невозможно изолировать радиатор от шасси, применяют изоляционные прокладки между полупроводниковым прибором и радиатором. Это приходится делать и в тех случаях, когда в качестве радиатора используются шасси радиоэлектронного устройства либо несколько транзисторов установлены на одном радиаторе и включены по схеме с общей базой или общим эмиттером.

В качестве изоляционных материалов для прокладок нашли применение бакелитовый лак, слюда, полихлорвиниловые, фторопластовые и лавсановые пленки. Наиболее широкое применение находят прокладки из слюды толщиной 0,06—0,15 *мм.* Применение прокладок из слюды увеличивает тепловое сопротивление $R_{к.р}$ на 0,7—1,5 °С/*вт,* однако сами прокладки имеют незначительное тепловое сопротивление порядка 0,25—0,5 °С/*вт.* Это несоответствие объясняется тем, что добиться полного прилегания двух любых поверхностей крайне трудно и между ними образуется некоторый воздушный зазор, увеличивающий тепловое сопротивление.

Замена слюды тонкими пленками из лавсана или фторопласта толщиной 10 *мкм* улучшает тепловой контакт за счет лучшего прилегания к контактирующим поверхностям, но возникает опасность пореза или прокола этих пленок. Для обеспечения большей надежности тонких пленок применяются многослойные изолирующие прокладки фольга—пленка—фольга. Фольга защищает пленку и улучшает контактирование прокладки с металлом полупроводникового прибора и радиатора. Фольга может быть медной, алюминиевой или свинцовой толщиной 10—40 *мкм.* Применение многослойных прокладок снижает тепловое сопротивление $R_{к.р}$, но при этом все же не удается ликвидировать имеющиеся воздушные зазоры.

В качестве изоляционных прокладок используются также окисные пленки, создаваемые на поверхности радиатора электрохимическим способом. Примером может быть эматалевое покрытие алюминия, которое представляет собой плотную, механически прочную пленку с высоким пробивным напряжением при толщине в несколько микрон.

Эматалирование осуществляется следующим образом. Место эматалирования полируют до зеркального блеска (царапин и вмятин не должно быть), протирают ацетоном и химически обезжиривают в следующем растворе:

тринатрийфосфат—50 *г/л;*
едкий натр—10 *г/л;*
жидкое стекло—30 *г/л.*

Время обезжиривания 2—3 *мин;* температура раствора 50—60 °С.

После обезжиривания желательно произвести химическое полирование. Для этого деталь помещают на 5—10 *мин* в следующий раствор:

ортофосфорная кислота—75 в. ч.;
серная кислота—25 в. ч.

Температура раствора 90—100 °С.

Деталь после полирования промывают и опускают в ванну с электролитом. Ванной может служить стеклянная, керамическая или эмалированная посуда. Электролитом для эматалирования служит следующий раствор:

хромовый ангидрид — 100 *г/л*;

борная кислота—3—4 *г/л*.

Температура электролита 40—45 °С. Продолжительность процесса 30—40 *мин*. Деталь служит анодом; в качестве катода используется нержавеющая сталь. Соотношение весов анода и катода 1:2. Для эматалирования деталь опускают в ванну при включенном источнике тока. Плотность тока составляет 1—1,2 *а/дм²* при напряжении на ванне 40 *в*.

Другим видом покрытия является глубокое анодирование алюминия с последующим уплотнением окисной пленки и пропиткой в электроизоляционном лаке.

Глубокое анодирование производят в электролите следующего состава:

серная кислота — 170—200 *г/л*;

сернокислый алюминий—10—20 *г/л*.

Катодом служат свинцовые пластины. Режим процесса зависит от марки сплава. Чистый алюминий травят при температуре раствора от 0 до —5 °С; начальное напряжение 15—20 *в*, конечное 50—80 *в*. Плотность тока 2—2,5 *а/дм²*. Продолжительность анодирования 1,5 *ч*. Электролит необходимо непрерывно перемешивать. Цвет анодированной пленки от серого до черного. Глубина анодирования получается не менее 30 *мкм*.

Покрытия подобного рода обеспечивают особенно хороший тепловой контакт при применении вязких масел или фольги.

ПРИЛОЖЕНИЯ

1. Примеры расчета радиаторов

Пример 1. Определить температурный режим транзистора П304 при рассеиваемой мощности 1,8 *вт*.

Условия работы: температура окружающей среды $t_{\text{с}} = 50\,°\text{C}$; свободная конвекция.

Тепловые данные транзистора П304:

$$t_{\text{п. макс}} = 150\,°\text{C}; \quad R_{\text{п. с}} = 50\,°\text{C}/\mathit{вт}.$$

Определим температуру перехода при заданных условиях:

$$t_{\text{п}} = t_{\text{с}} + P R_{\text{п. с}} = 50 + 1{,}8 \cdot 50 = 140\,°\text{C}.$$

Очевидно, что транзистор типа П304 в заданных условиях может работать без теплоотвода.

Пример 2. Определить максимально допустимое тепловое сопротивление радиатора $R_{\text{р. с}}$ для транзистора КТ802А. Мощность, рассеиваемая транзистором, 6 *вт*. Температура окружающей среды $t_{\text{с}} = 50\,°\text{C}$.

Тепловые данные транзистора КТ802А:

$$t_{\text{п. макс}} = 150° \text{ C}; \quad R_{\text{п. к}} = 2{,}5 \text{ °C}/\text{вт}.$$

Принимая $R_{\text{к.р}} = 1$ °C/вт, получаем:

$$R_{\text{р. с}} = \frac{t_{\text{п. макс}} - t_{\text{с}}}{P} - R_{\text{п. к}} - R_{\text{к. р}} = \frac{150 - 50}{6} - 2{,}5 - 1 \approx 13 \text{ °C}/\text{вт}.$$

Пример 3. Определить площадь пластинчатого радиатора при заданном тепловом сопротивлении (данные предыдущего примера). Материал радиатора — алюминий.

Определяем площадь радиатора:

$$S_{\text{р}} = \frac{800}{R_{\text{р. с}}} = \frac{800}{13} \approx 61{,}5 \text{ см}^2.$$

Длина и ширина такого радиатора равна $\sqrt{61{,}5} \approx 8 \times 8$ *см*. Для изготовления радиатора нужен алюминий толщиной не менее 1,6 *мм*.

Пример 4. Определить, какую мощность рассеивает ребристый радиатор (см. рис. 19), имеющий следующие геометрические размеры: $l = 58$ *мм*; $l = 60$ *мм*; $H = 40$ *мм*; $h = 35$ *мм*; $b = 6$ *мм*; $\delta = 2$ *мм*; количество ребер $n = 8$.

Условия работы: температура окружающей среды 50 °С; свободная конвекция; материал радиатора — дюралюминий Д16; степень черноты покрытия радиатора $\varepsilon = 0{,}4$, ориентация ребер вертикальная.

1. Задаемся средней температурой поверхности радиатора $t_s = 75$ °С. Величина t_s не должна быть меньше $t_{\text{с}}$ и больше $t_{\text{п}}$.

2. Определяем разность температур между наружными поверхностями S_3, S_4, S_5 и окружающей средой по формуле

$$\theta_{\text{р. с}} = t_s - t_{\text{с}};$$

$$\theta_{\text{р. с 3}} = \theta_{\text{р. с 4}} = \theta_{\text{р. с 5}} = 75 - 50 = 25 \text{ °C}.$$

Определяем величину t_m по формуле

$$t_m = 0{,}5\,(t_s + t_{\text{с}}) = 0{,}5\,(75 + 50) = 62{,}5 \text{ °C}.$$

Определяем температуру среды между ребрами $t_{i\text{с}}$.

$$\eta = k_1\, b \left(\frac{t_s - t_{\text{с}}}{l}\right)^{1/4} = 0{,}31 \cdot 6 \left(\frac{25}{60}\right)^{1/4} = 1{,}49.$$

Здесь k_1 для $t_m = 62{,}5$ равны 0,31 (см. табл. 8).

По табл. 9 определяем коэффициент k и находим $t_{i\text{с}}$ по формуле

$$t_{i\text{с}} = t_s - (t_s - t_{\text{с}})\,k = 75 - (75 - 50) \cdot 0{,}68 \approx 58 \text{ °C}.$$

Определяем разность температур между внутренними поверхностями S_1, S_2 и окружающей эти поверхности средой:

$$\theta_{\text{р. с 1}} = \theta_{\text{р. с 2}} = t_s - t_{i\text{с}} = 75 - 58 = 17 \text{ °C}.$$

3. Определяем коэффициенты теплопередачи $\alpha_{\text{к}}$ и $\alpha_{\text{л}}$ для внутренних поверхностей S_1 и S_2.

$$t_{im} = t_{m1} = t_{m2} = 0{,}5\,(t_s - t_{i\text{с}}) = 0{,}5\,(75 + 58) = 66{,}5 \text{ °C}.$$

По табл. 1 находим коэффициент k и определяем $\alpha_{к1}$ и $\alpha_{к2}$ по формуле

$$\alpha_{к1} = \alpha_{к2} = k\left(\frac{t_s - t_{1c}}{l}\right)^{1/4} = 1,31\left(\frac{75-58}{0,06}\right)^{1/4} = 5,37 \ вт/(м^2\cdot{}^\circ C)$$

Определяем коэффициент теплоотдачи $\alpha_к$ для наружных поверхностей S_3, S_4, S_5:

$$t_m = 0,5(t_s + t_c) = 0,5(75+50) = 62,5\ {}^\circ C; \qquad k = 1,3;$$

$$\alpha_{к3} = \alpha_{к4} = \alpha_{к5} = k\left(\frac{t_s - t_c}{l}\right)^{1/4} = 1,3\left(\frac{75-50}{0,06}\right)^{1/4} = 5,9\ вт/(м^2\cdot{}^\circ C).$$

Определяем коэффициент теплоотдачи $\alpha_л$ по формуле

$$\alpha_л = \varepsilon_{12}\,\varphi_{12}\,\theta.$$

Здесь θ функция температуры первой t_1 и второй t_2 поверхностей, участвующих в теплообмене, значение которой определяется по табл. 5. В нашем случае $\theta = 8.4$.

Коэффициент φ_{12} для внутренних поверхностей определяем по формуле

$$\varphi_{12} = \frac{b}{b+2h} = \frac{6}{6+2\cdot 35} \approx 0,08.$$

Для наружных поверхностей $\varphi_{12}=1$. Степень черноты задана и равна 0,4.

Вычисляем коэффициенты теплоотдачи:

$$\alpha_{л1} = \alpha_{л2} = 0,4\cdot 0,08\cdot 8,4 \approx 0,27\ вт/(м^2\cdot{}^\circ C);$$

$$\alpha_{л3} = \alpha_{л4} = \alpha_{л5} = 0,4\cdot 1\cdot 8,4 \approx 3,3\ вт/(м^2\cdot{}^\circ C).$$

Находим общий коэффициент теплоотдачи отдельных поверхностей:

$$q_i = \frac{t_s - t_{ic}}{t_s - t_c} = \frac{75-58}{75-50} = 0,68;$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_к q_i + \alpha_л = 5,37\ 0,68 + 0,27 = 3,9\ вт/(м^2\cdot{}^\circ C);$$

$$\alpha_3 = \alpha_4 = \alpha_5 = \alpha_к + \alpha_л = 5,9 + 33 = 9,2\ вт/(м^2\cdot{}^\circ C).$$

4. Определяем площади поверхностей теплообмена радиатора:

$$S_1 = (n-1)\,bl = (8-1)\cdot 6\cdot 60 = 0,25\cdot 10^{-2}\ м^2;$$

$$S_2 = 2(n-1)\,hl = 2(8-1)\cdot 35\cdot 6) = 2,94\cdot 10^{-2}\ м^2;$$

$$S_3 = 2\,hl = 2\cdot 35\ 60 = 0,42\cdot 10^{-2}\ м^2;$$

$$S_4 = n\,\delta\,(l + 2h) + 2(H-h)\,L = 8\cdot 2\,(60 + 2\cdot 35) + 2\,(40-35)\cdot 58 =$$
$$= 0,26\cdot 10^{-2}\ м^2;$$

$$S_5 = L\,l = 58\cdot 60 = 0,35\cdot 10^{-2}\ м^2.$$

5. Находим мощности, рассеиваемые отдельными поверхностями и радиатором в целом:

$$P = \alpha\,\theta_{р.с}\,S,$$

$$P_1 = 3,9\cdot 17\cdot 0,25\cdot 10^{-2} = 0,16\ вт;\quad P_2 = 3,9\cdot 1,7\cdot 2,94\cdot 10^{-2} = 1,95\ вт$$

$P_3 = 9{,}2 \cdot 25 \cdot 0{,}42 \cdot 10^{-2} = 0{,}96$ *вт*; $P_4 = 9{,}2 \cdot 25 \cdot 0{,}26 \cdot 10^{-2} = 0{,}6$ *вт*;

$P_5 = 9{,}2 \cdot 25 \cdot 0{,}35 \cdot 10^{-2} = 0{,}8$ *вт*; $P \approx 4{,}5$ *вт*.

Пример 5. Рассчитать габариты ребристого радиатора (см. рис. 19) для транзистора типа П210, рассеиваемая мощность которого $P = 12$ *вт*.

Условия работы: температура окружающей среды 25 °С; свободная конвекция; материал радиатора — дюралюминий Д16; степень черноты покрытия радиатора $\varepsilon = 0{,}4$; изоляционная прокладка между корпусом транзистора и радиатором — слюда толщиной 0,1 *мм*.

Тепловые данные транзистора П210:

$$t_{\text{п}} = 70\ °\text{C}; \quad R_{\text{п. к}} = 1 °\text{C}/\text{вт}.$$

1. Определяем температуру корпуса транзистора:

$$t_{\text{к}} = t_{\text{п}} - P R_{\text{п. к}} = 70 - 12 \cdot 1 = 58\ °\text{C}.$$

2. Находим разность температур между корпусом транзистора и радиатором для данного типа изоляционной прокладки:

$$\theta_{\text{к. р}} = P R_{\text{к. р}} = 12 \cdot 1{,}7 = 20{,}4\ °\text{C}.$$

(Величина $R_{\text{к. р}}$ для слюды толщиной 0,1 *мм* равна 1,7°С/*вт*.).

3. По номограмме на рис. 13 по известным значениям $t_{\text{к}}$, $\theta_{\text{к. р}}$, $t_{\text{с}}$ определяем среднюю температуру поверхности t_s, разность температур между радиатором и окружающей средой $\theta_{\text{р. с}}$ и среднюю температуру t_m;

$$t_s \approx 34\ °\text{C}; \quad \theta_{\text{р. с}} \approx 10\ °\text{C}; \quad t_m \approx 30\ °\text{C}.$$

Приняв протяженность радиатора l равной 100 *мм*, найдем по номограмме на рис. 14 коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{к}}$:

$$\alpha_{\text{к}} = 4{,}3\ \text{вт}/(\text{м}^2 \cdot °\text{C}).$$

По номограмме на рис. 15 определяем значение коэффициента $\alpha_{\text{л}}$:

$$\alpha_{\text{л}} = 2{,}5\ \text{вт}/(\text{м}^2 \cdot °\text{C}).$$

4. Находим общий коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \alpha_{\text{к}} + \alpha_{\text{л}} = 4{,}3 + 2{,}5 = 6{,}8\ \text{вт}/(\text{м}^2 \cdot °\text{C}).$$

5. По номограмме на рис. 18 определяем поверхность теплообмена:

$$S_{\text{р}} = 0{,}18\ \text{м}^2 = 18 \cdot 10^4\ \text{мм}^2.$$

6. Принимаем $h = 30$ *мм*; $b/h = 0{,}3$ и находим $b = 9$ *мм*.

7. Выбираем $d = 4$ *мм*; $\delta = 2$ *мм* и рассчитываем площади $S_{\text{А}}$ и $S_{\text{Б}}$:

$$S_{\text{А}} = 2\left[(l + \delta)(h + d) + l(b + d) + bd\right] - dl = 2\left[(100 + 2)(30 + 4) + 100(9 + 4) + 9 \cdot 4\right] - 4 \cdot 100 = 9\,208\ \text{мм}^2;$$

$$S_{\text{Б}} = 2\left[(l + \delta)(h + d) + l\delta\right] - dl = 2\left[(100 + 2)(30 + 4) + 100 \cdot 2\right] - 4 \cdot 100 = 6\,936\ \text{мм}^2.$$

8. Определяем число ребер:

$$n = \frac{S_p - S_Б}{S_A} + 1 = \frac{18 \cdot 10^4 - 6\,936}{9\,208} + 1 \approx 20.$$

9. Вычисляем ширину радиатора:

$$L = (n - 1)(b + \delta) + \delta = (20 - 1)(9 + 2) + 2 = 211 \text{ мм}.$$

В результате расчета мы видим, что для обеспечения нормального теплового режима транзистора типа П210 при рассеиваемой мощности 12 *вт* и температуре окружающей среды 25°С необходим радиатор со следующими геометрическими размерами: $L=211$ *мм*; $l=100$ *мм*; $h=30$ *мм*; $b=9$ *мм*; $d=4$ *мм*; $\delta=2$ *мм*; $n=20$.

2. Размеры пластинчатых радиаторов для транзисторов

Тип транзистора	*P, вт*	Размеры пластины радиатора $L \times l \times d$, *мм*
П302	5	90× 90×4
	6	100×100×4
П601	1	50× 50×3
	2	75× 75×3
	3	100×100×3
	4	75× 75×4
П213—П215	1	40× 40×4
	2	50× 50×3
	3	65× 65×3
	4	90× 90×3
П216—П217	2	65× 65×3
	3	90× 90×3
	5	115× 70×3
П210	5	110×110×3

Примечание. Материал радиаторов— алюминий и его сплавы.

3. Размеры ребристых радиаторов для транзисторов

Тип транзистора	Количество транзисторов на радиаторе	P, вт	Конструктивные размеры, мм (см. рис. 19)						
			l	L	h	b	δ	d	n
П210	1	5	115	93	15	11	2	3	8
П216—П213	3	6	115	119	20	11	2	3	10
П210	1	10	170	106	23	11	2	3	9
П217	1	6	100	100	20	10	2	4	9
П213—П216	1	4	60	60	12	7	2,5	4	7
П216—П217	1	8	80	80	20	7	2,5	5	9

Примечание. Радиаторы рассчитаны для работы при температуре окружающей среды 60°С. Материал радиаторов—алюминий или его сплавы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дульнев Г. Н. Теплообмен в радиоэлектронных устройствах. М., Госэнергоиздат, 1963.

2. Давидов П. Д. Анализ и расчет тепловых режимов полупроводниковых приборов. М., «Энергия», 1967.

3. Справочник по полупроводниковым диодам и транзисторам. Под ред. Н. Н. Горюнова. М., «Энергия», 1964.

4. Агапова М. Г., Гальперин Е. И. Основы тепловых расчетов полупроводниковых приборов с радиаторами. Под ред. Я. А. Федотова. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. М., «Советское радио», 1965, вып. 14.

5. Веденеев Г. М., Скрипник С. И. Об улучшении отвода тепла от мощных полупроводниковых приборов. — В кн.: Полупроводниковые приборы и их применение. М., «Советское радио», 1962, вып. 8.

6. Транзисторы. Параметры, методы измерений и испытаний. М., «Советское радио», 1968.

7. Ахматова О. и др. Теплоотводы для маломощных транзисторов. — «Радио», 1966, № 4.

8. Заливадный Б. Теплоотводы для маломощных транзисторов и диодов. — «Радио», 1967, № 9.

9. Агеев. Расчет радиаторов для диодов и транзисторов. — «Радио», 1968, № 6.

10. Джонсон Р. Как строить радиоаппаратуру. М., «Энергия», 1968.

11. Ерлыкин Л. А. Практические советы радиолюбителю. М., Воениздат, 1965.

СОДЕРЖАНИЕ